

## RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Wojciecha Kucaba pt.

### **Analiza nierównomierności obciążenia przekładni zębatej układu napędowego siłowni okrętowej**

Podstawa prawna: zlecenie Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej z dnia 16 marca 2018 roku.

#### *Tematyka i cel rozprawy*

Opiniowana rozprawa doktorska jest poświęcona problemom projektowania przekładni zębatej na przykładzie okrętowej przekładni redukcyjnej napędu głównego ze szczególnym uwzględnieniem problematyki właściwego doboru współczynników nierównomierności obciążenia  $K$ .

Okrętowe przekładnie zębate w układzie napędowym statku są urządzeniami złożonymi i kosztownymi. Ich zastosowanie na statkach umożliwia zastosowanie zwartych jednostek napędowych różnego typu napędzających relatywnie wolno obracającą się wysokosprawną śrubę napędową. Zastosowanie przekładni redukcyjnej na małych i średnich statkach jest już dziś rozwiązaniem typowym. Podstawową zaletą takiego rozwiązania jest ograniczenie rozmiarów i masy siłowni okrętowej.

Przekładnie zębate są urządzeniami odpowiedzialnymi. Od ich trwałości i niezawodności zależy bezpieczeństwo żeglugi. Proces projektowania, wykonania i montażu oraz podczas eksploatacji i okresowych przeglądów przekładnia główna podlega kontroli przez towarzystwa klasyfikacyjne.

Problem przedwczesnego zużycia przekładni redukcyjnej na statkach wyposażonych w siłownię średniej lub małej mocy wyprodukowanych w końcu XX wieku występował sporadycznie (doświadczenia stoczni Remontowa SA oraz towarzystw klasyfikacyjnych).

Wynikało to między innymi z faktu, że przyjmowano takie wartości współczynników, aby zapewnić trwałość i wysoki stopień bezpieczeństwa. Konsekwencją były znaczne rozmiary i masy przekładni.

Specyficzne, złożone problemy występujące w nowoczesnych przekładniach zębatych wynikają z wytężania tych konstrukcji spowodowanej potrzebą redukcji ich masy oraz kosztów produkcji. Zastosowanie wysokiej jakości materiałów oraz rozwój technologii obróbki sprawia, że jakość przekładni zębatych rośnie. Konkurencja zwłaszcza pomiędzy producentami europejskimi a dalekowschodnimi sprawia, że producenci ostro konkurują również obniżając ceny.

Dlatego efektywne projektowanie przekładni zębatych przenoszących duże moce w układzie napędu statku jest niewątpliwie ważne, a przewymiarowanie konstrukcji powoduje niepotrzebny wzrost strat energetycznych oraz kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych.

Efektywne projektowanie wymaga zastosowania nowoczesnych narzędzi do symulacji numerycznych zagadnień wytrzymałościowych, w tym dynamiki konstrukcji.

Obecnie stosowane metody obliczeniowe przekładni zębatych bazują na współczynnikach, które są dobierane w przypadku okrętownictwa z przepisów towarzystw klasyfikacyjnych. Opracowanie nowych wartości współczynników jest miarą postępu i rozwoju wiedzy. Często też tzw. „Rady Techniczne” towarzystw klasyfikacyjnych akceptują propozycje zmian tak, aby przepisy nadążały za postępem i aktualnym stanem wiedzy.

Jak widać z powyższego, tematyka opiniowanej rozprawy jest współcześnie bardzo ważna zarówno od strony czysto aplikacyjnej jak i od strony poznawczej. Podjęcie tej tematyki w rozprawie doktorskiej uważam za uzasadnione i celowe.

Doktorant sformułował na stronie 18 cel rozprawy w następujący sposób:

*„Celem pracy jest opracowanie analityczno-numerycznej metodyki projektowania przekładni zębatej układu napędowego siłowni okrętowej, która w połączeniu z nowoczesnymi narzędziami CAE pozwoli na lepszą identyfikację nierównomierności obciążenia kół zębatych.”*

Tak zapisany cel rozprawy stanowi prawidłowo postawione zadanie naukowe, którego rozwiązaniem powinna być, w myśl wymagań ustawowych, każda rozprawa doktorska.

### *Ocena strony formalnej rozprawy*

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska obejmuje 176 stron tekstu w języku polskim i jest podzielona na dziewięć rozdziałów, uzupełnionych spisem oznaczeń i spisem literatury.

Pierwszy rozdział zawiera wprowadzenie i motywację do podjęcia badań w tematyce rozprawy. W tym rozdziale znajduje się większość odwołań do licznej, bo zawierającej 177 pozycji literatury.

Rozdział drugi prezentuje współczynniki określające nierównomierność obciążenia, których znajomość niezbędna jest do wykonania obliczeń przekładni zębatej.

W rozdziale trzecim doktorant opisał przyjęty do analizy układ napędowy statku.

W rozdziałach od 4 do 7 doktorant opisał wynik swoich badań koncentrujących się na sposobie wyznaczenia współczynników nierównomierności obciążenia okrętowej przekładni zębatej.

W rozdziale 8 autor przedstawił analizę wyników obliczeń.

W rozdziale 9 znajduje się podsumowanie, wnioski i propozycje kierunków dalszych badań.

Opisana powyżej struktura opiniowanej rozprawy jest moim zdaniem przejrzysta, logiczna i odpowiednia dla prac naukowych. Praca jest napisana w dobrym i zrozumiałym językiem, przy wykorzystaniu prawidłowej terminologii technicznej. Opracowanie edytorskie rozprawy jest dobre, z właściwym wykorzystaniem odpowiednio przygotowywanych ilustracji.

### *Ocena zawartości naukowej rozprawy*

Zasadniczym elementem naukowym opiniowanej rozprawy jest model obliczeniowy przekładni zębatej, którego znaczącymi składnikami są współczynniki nierównomierności obciążenia. Sam model obliczeniowy jest znany i stosuje się go od lat. Jest on szeroko opisany w literaturze cytowanej przez doktoranta.

Problemem jednak do dziś jest przyjęcie właściwych – adekwatnych do warunków pracy współczynników które określają:

- obciążenia pochodzące od sił zewnętrznych –  $K_A$  – tzw. współczynnik przeciążenia lub współczynnik zastosowania,

- obciążenia pochodzące od sił wewnętrznych –  $K_V$  – tzw. współczynnik dynamiczny,
- nierównomierność rozkładu obciążenia wzdłuż linii styku -  $K_\beta$ ,
- nierównomierność rozdziału obciążenia pary zębów znajdującej się w przyporze -  $K_\alpha$ .

Właściwy dobór współczynników pozwala na optymalne zaprojektowanie przekładni bez nieuzasadnionego przewymiarowania konstrukcji.

Doktorant jako przedmiot swoich badań przyjmuje dwustopniową przekładnię zębatą. Jest to rozwiązanie stosowane w układach napędów głównych statków dość rzadko. W analizowanym przypadku jako napęd główny wykorzystano dwa silniki elektryczne o różnej mocy pracujących na jeden wał.

Autor rozprawy kolejno przedstawia wyniki swoich badań wyznaczając wartości współczynników.

Jako pierwszy wyznaczony został współczynnik przeciążenia  $K_A$ . Doktorant posłużył się wyspecjalizowanym oprogramowaniem towarzystwa klasyfikacyjnego DNV-GL *Nauticus Machinery Torsional Vibration*. Zbudował model (rys. 4.1. str. 62 oraz 4.5 str. 73) odpowiadający rzeczywistej analizowanej konstrukcji. Po przeprowadzeniu analizy i obliczeniach zaproponował wartość współczynnika  $K_A=1,041$ . Jest to wartość niższa od tych, które można znaleźć w aktualnych źródłach o około 5%.

Następnie doktorant zbudował model dynamiczny przekładni (rys. 5.1 str. 82), aby obliczyć wartość  $K_V$  – tzw. współczynnika dynamicznego. Do symulacji wykorzystano program SIMPACK. Umożliwił on między innymi zasymulowanie wpływu odchyłki podziałki kół zębatych na drgania. Prowadząc symulacje doktorant przyjął maksymalne wartości odchyłek dla przyjętej klasy obróbki. Pozwoliło to ograniczyć wartość współczynnika  $K_V$  dla pierwszego stopnia przekładni względem wartości uzyskanych z obliczeń metodą uproszczoną.

Kolejnym analizowanym współczynnikiem był  $K_{H\beta}$  – współczynnik nierównomierności rozkładu obciążenia wzdłuż linii styku. Jest to najbardziej rozbudowany fragment pracy obejmujący 49 stron. Doktorant przeprowadza dokładną analizę czynników, które mają wpływ na nierównomierności rozkładu obciążenia wzdłuż linii styku. Analizuje kolejno: wpływ odkształceń skrętnych i giętnych, rozkład obciążenia uzyskany metodą iteracyjną, wpływ mas komponentów, wpływ usztywnienia wałów, wpływ naprężeń ścinających, wpływ luzu wewnętrznego łożysk, wpływ luzu roboczego oraz odkształceń sprężystych łożysk, wpływ osiowania wału śruby okrętowej, wpływ odkształceń sprężystych korpusów kół zębatych, wpływ odkształceń sprężystych korpusu przekładni, wpływ odkształceń cieplnych korpusu przekładni, wzrost wartości współczynnika  $K_{H\beta}$  pod wpływem

współczynników  $K_A$  i  $K_v$  oraz wpływ modyfikacji geometrii zębów. W tym celu przeprowadził między innymi analizę MES sztywności korpusu przekładni oraz korpusów kół zębatach przy użyciu programu Ansys oraz obciążenia elementów łożysk tocznych – program KISSsoft. Doktorant przeprowadził analizę osiowania linii wału na pracę przekładni. Przeprowadzona analiza wykazała, że istotny wpływ na rozkład obciążenia wzdłuż linii styku poza odkształceniami skrętnymi i giętymi wałów ma wielkość ich usztywnienia, luz łożysk oraz ich odkształcenia sprężyste. Wpływ tych czynników jest często pomijany podczas projektowania modyfikacji linii zęba w mniej odpowiedzialnych konstrukcjach, co jak doktorant wykazał, może prowadzić do dużej, nieakceptowalnej nierównomierności rozkładu obciążenia.

Ostatnim analizowanym współczynnikiem jest  $K_\alpha$  – współczynnik nierównomierności rozkładu obciążenia dla pary zębów w przyporze. Doktorant zbudował model dynamiczny w środowisku SIMPACK. Wyniki symulacji potwierdziły fakt, że wraz ze wzrostem dokładności obróbki współczynnik  $K_\alpha$  zbliża się do wartości 1 oznacza to, że zmniejszają się wahania siły obciążającej przekładnię.

Oceniając wyżej opisaną zawartość naukową opiniowanej rozprawy należy podkreślić co następuje:

- doktorant wykazał się bardzo dobrym opanowaniem aktualnej wiedzy z zakresu budowy i eksploatacji maszyn, mechaniki konstrukcji oraz zaawansowanych metod numerycznych w obszarze dotyczącym podzespołów przekładni zębatach,
- doktorant utworzył w oparciu o programy komercyjne model obliczeniowy pozwalający na symulację stanów dynamicznych przekładni zębatej. Oryginalny wkład doktoranta dotyczy głównie modelowania wielostopniowej przekładni zębatej dużej mocy.

Cel pracy sformułowany przez doktoranta we wstępnej części rozprawy czyli opracowanie analityczno-numerycznej metodyki projektowania przekładni zębatej układu napędowego siłowni okrętowej został tym samym osiągnięty – doktorant prawidłowo rozwiązał postawione przed nim zadania naukowe, a jego rozwiązanie zawiera istotne elementy oryginalne i co ważne dla doktoranta pracującego w przemyśle posiada duże praktyczne znaczenie aplikacyjne.

## *Uwagi krytyczne*

Wobec mojej generalnie pozytywnej oceny opiniowanej rozprawy zamieszczone poniżej uwagi krytyczne dotyczą spraw mniejszej wagi i tej oceny w żadnym stopniu nie zmieniają:

- Opisane w pracy na stronie 51 zalety napędu spalinowo – elektrycznego uważam za zbyt optymistyczne. Stwierdzenie, że „*Głównym czynnikiem przemawiającym za stosowaniem napędu typu Diesel-Electric jest jego wysoka sprawność.*” jest tylko częściowo prawdziwe. Siłownię typowego statku transportowego projektuje się tak aby właśnie podczas żeglugi z założoną prędkością podrózną siłownia pracowała z wysoką sprawnością. Dlatego na typowych, powszechnych statkach transportowych nie stosuje się napędu spalinowego z napędem spalinowo – elektrycznym. Za to powszechnie występują tego typu napędy na statkach specjalnych (obsługa pól naftowych, lodołamacze), statkach pasażerskich (ze względu na niski poziom drgań i ogromne zużycie energii elektrycznej także podczas postoju) czy okrętach wojennych (zasilanie uzbrojenia).
- Za słabość pracy uważam fakt, że doktorant przeprowadził jedynie badania teoretyczne wykorzystując komercyjne oprogramowanie. Żałuję, że nie podjęto badań obiektu w mniejszej skali, dla którego można było by przeprowadzić badania eksperymentalne albo wykorzystać opublikowane wyniki badań zrealizowane w innych ośrodkach.
- Doktorant bardzo szczegółowo analizuje wpływ różnych czynników na nierównomierność obciążenia przekładni. Zaskoczył mnie fakt, że kluczowy moim zdaniem czynnik – wpływ silników napędowych opisano na stronach 51-53 pobieżnie. Ja widzę tutaj szereg problemów w ogóle nie rozważanych w pracy takich jak:
  - praca dwóch silników na jeden wał,
  - charakterystyka momentowa silników zależna od oprogramowania przemienników częstotliwości,
  - moc na wale w zależności od oprogramowania przemiennika częstotliwości (jest inna w pracy niż tak wynikająca z danych katalogowych).Dlatego mam wątpliwości czy z praktycznego, inżynierskiego punktu widzenia drobiazgowo analizowanie różnych czynników ma sens jeśli można w łatwy sposób zmienić kluczowe dla przekładni charakterystyki mocy źródła mocy – zmieniając oprogramowanie przekształtników częstotliwości.

- Mam pewne zastrzeżenia i wątpliwości do części wykresów umieszczonych w pracy np.:
  - str. 75 wykres 4.6 „Charakterystyka sumarycznego momentu obrotowego na wale wejściowym w odniesieniu do prędkości obrotowej silników”. Zapoznałem się z charakterystyką silników zastosowanych a analizowanym rozwiązaniu. Proszę o wyjaśnienie dlaczego „Z wykresu (rys. 4.6) można zauważyć, że układ dwóch silników osiąga maksymalny moment obrotowy  $T_n$  przy prędkości obrotowej  $n_0=1200$  obr/min”. Czy rzeczywiście moment rozruchowy jest zerowy? Myślę, że wykres niedostatecznie wyjaśniono. Nie uwzględniono również faktu, że układ napędowy wyposażony jest w śrubę nastawną. Na stronie 53 doktorant stwierdził że: „Układy napędowe Diesel-Electric są często pierwszym wyborem w przypadku jednostek pływających jak promy, holowniki, pogłębiarki czy lodolamacze, **czyli tam gdzie wymagana jest duża manewrowość oraz dostępność maksymalnego momentu przy niskich prędkościach**”. Komentarz ten jest moim zdaniem sprzeczny z wykresem 4.6. ze strony 75.
  - str. 76-78 wykresy 4.7 do 4.10. W jaki sposób wykonano charakterystyki momentów dynamicznych na kolejnych kołach przekładni? Problem niedostatecznego opisanie prezentowanych wyników to moim zdaniem pewna słabość rozprawy.
  - str. 89 wykresy odchyłek podziałki wynikających z klasy wykonania ilustracje nr. 5.6 – 5.9 – przeprowadzając taką analizę żałuję, że doktorant nie zdecydował się na analizę wpływu klasy dokładności wykonania na własności dynamiczne przekładni.
  - str. 92 wykresy 5.10 i 5.11 – przebieg siły międzyzębnej w czasie – czy wykres obejmuje on rozruch silnika?

### **Wniosek końcowy**

W podsumowaniu chciałbym stwierdzić, że praca mgr inż. Wojciecha Kucaba pt. „Analiza nierównomierności obciążenia przekładni zębatej układu napędowego siłowni okrętowej” spełnia wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i według mnie może być dopuszczona do publicznej obrony.

