

Dr hab. inż. Piotr Skawiński, prof. PW
Zakład Techniki Wytwarzania
Instytut Podstaw Budowy Maszyn
Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych

Warszawa, 11.06.2018

Sz. Pan
Prof. dr hab. inż. Jarosław Sęp
Dziekan
Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa
Politechniki Rzeszowskiej

Opinia
rozprawy doktorskiej mgra inż. Wojciecha KUCABA

pt. *Analiza nierównomierności obciążenia przekładni zębatej układu napędowego siłowni okrętowej*

Podstawa opracowania recenzji: pismo Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej prof. dra hab. inż. Jarosława Sępa z dnia 16.03.2018r. o numerze RM-530-01-03-2018 na podstawie decyzji Rady Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa z dnia 14 marca 2018 roku.

1. Temat rozprawy doktorskiej

Przekładnie zębate stanowią nadal jeden z podstawowych elementów mechanicznych układów napędowych. Ciągłe z racji postępu w nauce doskonalone są metody i narzędzia badawcze, a to z kolei otwiera nowe możliwości poznawcze mające na celu podwyższenie jakości, wytrzymałości i niezawodności przekładni zębatej. Z pośród wielu przekładni stanowiących element układów napędowych maszyn i urządzeń, Doktorant wybrał przekładnię zębatą będącą częścią układu napędowego siłowni okrętowej, gdzie zasadnicze znaczenie ma wytrzymałość i niezawodność układu. Z racji statycznych i dynamicznych obciążeń przekładni jak i wszelkich nadwyżek zaistniałych wewnątrz i na zewnątrz układu napędowego, przekładnia musi być zdolna do przeniesienia tych obciążeń. Poznanie wszelkich zjawisk i czynników wpływających na nierównomierne obciążenie przekładni ma zasadnicze znaczenie w procesie projektowania na dokładność i poprawność obliczeń. To z kolei przekłada się na właściwe określenie cech konstrukcyjnych i eksploatacyjnych przekładni i eliminacji ewentualnych uproszczeń często występujących w postaci współczynników bezpieczeństwa, co w rezultacie oznacza określenie rzeczywistego obciążenia przekładni zębatej. Zadaniem każdego projektanta przekładni zębatych jest przyjęcie do obliczeń rzeczywistego obciążenia zębów przekładni, które jest wynikiem zwiększenia obciążenia nominalnego przez współczynniki nierównomierności do których zalicza się współczynnik zastosowania K_A , współczynnik dynamiczny K_V , współczynnik

nierównomierności rozkładu obciążenia wzdłuż linii styku K_{β} oraz współczynnik nierównomierności rozkładu obciążenia na pary zębów znajdujących się jednocześnie w przyporze K_{α} . Dążąc do określenia rzeczywistego obciążenia zębów przekładni siłowni okrętowej, Doktorant zajął się badaniami statycznych i dynamicznych źródeł nierównomierności obciążenia przekładni. Badania te miały również na celu weryfikację dokładności metod wyznaczania wartości tych współczynników. W rezultacie zaplanowanej identyfikacji nierównomierności obciążenia przekładni zębatej można wskazać kierunki zapewnienia jej większej niezawodności, a tym samym całego układu napędowego.

Temat rozprawy jest więc zatem wybrany właściwie, a rozważone w niej zagadnienia dotyczące badania statycznych i dynamicznych źródeł nierównomierności obciążenia przekładni zębatej, w tym także weryfikacji dokładności metod wyznaczania wartości poszczególnych współczynników ma znaczenie teoretyczne i praktyczne.

2. Omówienie rozprawy

Recenzowana rozprawa zawiera 9 rozdziałów i literaturę nam którą składają się 177 pozycji książkowych, skryptów, artykułów w czasopismach naukowych, wydawnictw i broszur firmowych, norm w tym tylko jednego współautorskiego artykułu opublikowanego w Zeszytach Naukowych Politechniki Rzeszowskiej.

We wstępie do rozprawy Doktorant po analizie literatury stawia tezę, cele i zakres pracy w którym pisze: „Istotą pracy jest wykazanie możliwości nowoczesnych narzędzi CAE oraz sposobu ich efektywnego wykorzystania do stworzenia jak najdokładniejszego modelu przekładni już na etapie projektowania i otrzymaniu wiarygodnych wyników w obliczeniach wytrzymałościowych”. Myślę, że istotą pracy jest tak jak pisze wcześniej Autor „...opracowanie analityczno-numerycznej metodyki projektowania przekładni zębatej...” na przykładzie układu napędowego siłowni okrętowej. Środowisko CAE to tylko narzędzia mające pomóc w realizacji celu.

W rozdziale 2 „Nierównomierność obciążenia przekładni zębatej układu napędowego siłowni okrętowej” Doktorant po zdefiniowaniu współczynnika nierównomierności obciążenia K_E omawia poszczególne składowe współczynniki odwołując się do norm i metod ich wyznaczania. Kolejne podrozdziały poświęcone są zdefiniowaniu poszczególnych współczynników (współczynnika zastosowania K_A , współczynnika dynamicznego K_V , współczynnika nierównomierności rozkładu obciążenia wzdłuż linii styku K_{β} i współczynnika nierównomierności rozkładu obciążenia na pary zębów znajdujących się jednocześnie w przyporze K_{α}) oraz metod ich wyznaczania w oparciu o normy ISO/DIN.

Rozdział 3 to „Charakterystyka analizowanego układu napędowego”, którym jest układ napędowy Diesel-Electric składający się z 3 generatorów diesla będących zespołem prądotwórczym zasilającym silniki elektryczne napędu śruby. Autor oprócz charakterystyki ogólnej układu napędowego koncentruje się głównie na konstrukcji przekładni zębatej, podając parametry analizowanej dwustopniowej przekładni zębatej, sprzęgieł, napędzających układ silników elektrycznych i śruby napędowej. Rozdział ten ma charakter definiujący dane wejściowe do dalszych analiz i budowy modeli matematycznych.

W rozdziale 4 Doktorant zajmuje się wyznaczaniem współczynnika zastosowania K_A bazując na analizie drgań skrętnych TVA z racji ryzyka wywołania rezonansu. Jest to analiza numeryczna układu napędowego pozwalająca na oszacowanie nadwyżek dynamicznych. Analizę przeprowadzono definiując model matematyczny przyjmując jako model masowo-sprężysty, zaś narzędziem środowiska CAE był program Machinery Torsial Vibration. W rezultacie wyznaczono przyjmowany do dalszych obliczeń współczynnik zastosowania $K_A = 1.05$ (zbieżność z wytycznymi biura certyfikującego BV (Bureau Veritas)).

Metodykę wyznaczania kolejnego współczynnika jakim jest współczynnik dynamiczny K_V przedstawiono w rozdziale 5. Skorzystano z analizy dynamicznej układu na podstawie zbudowanego wieloczołowego modelu fizycznego reprezentującego model dynamiczny dwustopniowej przekładni zębatej wykorzystując program komputerowy SIMPACK. Skomentowania wymaga fakt arbitralnego przyjęcia współczynnika 0,0001 przy definiowaniu macierzy tłumienia. Autor pisze, iż „w analizie uwzględniono wpływ zastosowanej modyfikacji głowy zęba mającej na celu uniknięcie uderzenia przy wchodzeniu zębów w zazębienie na skutek ich deformacji” odwołując się do rys. 5.4 i do tabeli 5.3, w której zestawiono wartości modyfikacji. Nie wyjaśniono jednak na czym polegała modyfikacja głowy zęba. Wnioski z przeprowadzonych analiz zestawiono w tabeli 5.5 uzupełniając stosownym podsumowującym komentarzem.

W rozdziale 6 pt. „Wyznaczanie współczynnika nierównomierności rozkładu obciążenia wzdłuż linii styku K_{HB} ” Doktorant bada wpływ różnorodnych czynników na rozkład obciążenia wzdłuż linii styku posługując się dwoma metodami: metodą C i metodą analityczną. Jest to obszerny rozdział rozprawy z racji analizy wpływu na współczynnik K_{HB} wielu czynników takich jak odkształcenia skrętne i giętne, masy komponentów (koła zębate, wały, sprzęgła, itd.), wpływ usztywnienia wałów (np. połączenia skurczowe), wpływ naprężeń ścinających, luzu wewnętrznego łożysk, luzu roboczego przekładni zębatej, odkształceń sprężystych łożysk, osiowania wału śruby okrętowej, odkształceń sprężystych korpusów kół zębatych, odkształceń sprężystych korpusu przekładni, odkształceń cieplnych korpusu przekładni i modyfikacji linii zęba. Badając wpływ poszczególnych czynników na współczynnik K_{HB} i wyznaczając jego wartość dowiedziono kompleksowego spojrzenia na problem złożonego jego zdefiniowania. Bogato ilustrowany niezbędnymi wykresami, rysunkami i tabelami czyni ten rozdział bardzo wartościowym rozprawą. Na uwagę zasługuje wykorzystanie środowiska MES do analiz korpusu przekładni i korpusów kół zębatych. Rozdział 6 kończy zestawienie tabelaryczne wyników analiz z konkluzją, że najbardziej istotny wpływ na rozkład obciążenia wzdłuż linii styku poza odkształceniami skrętnymi i giętymi wałów ma wielkość ich usztywnienia, luz łożysk oraz odkształcenia sprężyste. Zgodzić się trzeba z wnioskiem, co udowodniono w rozprawie, iż dla danej klasy dokładności uzębienia przy uwzględnieniu odchyłek wykonawczych, można uzyskać współczynnik nierównomierności rozkładu obciążenia wzdłuż linii styku na niskim poziomie.

Ostatnim rozdziałem zawierającym wyznaczanie współczynnika nierównomierności rozkładu obciążenia na pary zębów będących jednocześnie w przyporze K_α jest rozdział 7. Współczynnik ten Doktorant wyznacza wykorzystując model dynamiczny o dwóch stopniach

swobody wykorzystując przede wszystkim środowisko programu SIMPACK dla metody A. Dla metod uproszczonych B (obliczony) i C (przyjęty) współczynnik nierównomierności rozkładu obciążenia na pary zębów będących jednocześnie w przyporze K_α jest równy jedności. Nie negując wartości merytorycznej tego rozdziału i analiz zmiany współczynnika K_α z klasy 5 do 3, może warto by dokonać analizy w przypadku spadku klasy dokładności np. z 5 do 7.

Rozdział 8 to „Analiza wyników obliczeń”. Obszerna analiza końcowa jest skomentowaniem analiz i metod wyznaczania współczynników K_A , K_V , $K_{H\beta}$, K_α . Cennym zestawieniem jest tabela, w której zaprezentowano wartości współczynników nierównomierności obciążenia dla różnych metod ich ustalania wraz z współczynnikami bezpieczeństwa i niezawodnością przekładni. Zawartość tabeli wskazuje jednoznacznie na metodę A. Wartościowe są uwagi zawarte w tym rozdziale w kontekście zaleceń czy rekomendacji biur certyfikujących stosowania współczynników nierównomierności obciążenia.

Podsumowanie i wnioski zawarto w rozdziale 9. Mają one szczegółowy charakter odnoszący się do poszczególnych wykorzystywanych w rozprawie metod wyznaczania współczynników nierównomierności rozkładu obciążenia. Wnioski zawarte w tym rozdziale są merytoryczne i nie budzą żadnych zastrzeżeń. Mogą być wykorzystane przy projektowaniu podobnych układów napędowych. Kończąc omówienie rozprawy chcę zwrócić uwagę na podrozdział pt. „Propozycje i kierunki dalszych prac”. Zgadam się z Autorem, iż w dalszym badaniach w kontekście wyznaczania wartości współczynnika nierównomierności obciążenia trzeba objąć przekładnie zębate o śrubowej linii zęba, w szczególności zaś współczynniki $K_{H\beta}$, K_α . Kierunek dalszych badań to także wykorzystanie środowiska MBS do analiz porównawczych wyników uzyskanych w recenzowanej pracy.

3. Ocena ogólna rozprawy doktorskiej

Recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Wojciecha Kucaba pt. „Analiza nierównomierności obciążenia przekładni zębatej układu napędowego siłowni okrętowej” ujmuje kompleksowo zagadnienia związane z analityczno-numeryczną metodyką projektowania przekładni zębatej układu napędowego siłowni okrętowej. Zaproponowana metodyka określania nierównomierności obciążenia winna być rekomendowana przy projektowaniu przekładni okrętowych. Rozprawa ma charakter nie tylko naukowy, badawczy, ale także użytkowy i winna być pomocna przy projektowaniu przekładni zębatych o podwyższonych wskaźnikach jakościowych. Może być także wykorzystywana przy projektowaniu podobnych mechanicznych układów napędowych.

Rozprawa jest przygotowana bardzo starannie pod względem edycyjnym, napisana zrozumiałym, poprawnym pod względem technicznym językiem, bogato ilustrowana wykresami, tabelami i rysunkami co znacznie podnosi jej wartość merytoryczną. Spis oznaczeń, tabel i rysunków znacznie ułatwia lekturę rozprawy. W trakcie lektury rozprawy zauważono tylko kilka tzw. literówek. Nie mam żadnych uwag i zastrzeżeń co do zawartości merytorycznej rozprawy: proponowanych metod badawczych, budowy modeli fizycznych i matematycznych przekładni, analiz i wniosków końcowych.

4. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska „Analiza nierównomierności obciążenia przekładni zębatej układu napędowego siłowni okrętowej” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z ustawą z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Stawiam więc wniosek o dopuszczenie mgr inż. Wojciecha Kucaba do publicznej obrony, a po jej pozytywnym przebiegu o nadanie stopnia doktora nauk technicznych.

Mając na uwadze wartości naukowe i badawcze recenzowanej rozprawy jak i wyżej wyrażoną opinię w punktach 2 i 3 recenzji, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

Warszawa, 14.06.2018

