

Kraków, dnia 05 listopada 2018 r.

## Recenzja pracy doktorskiej

**mgr inż. Sławomira Baranowskiego:** *Wpływ podziału i szerokości kół zębatach na obciążenie uzębienia przekładni planetarnej*

### 1. Wprowadzenie.

Recenzję pracy doktorskiej wykonano na prośbę Rady Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej w Katowicach. Przedmiotowej oceny dokonano na podstawie otrzymanego egzemplarza pracy doktorskiej przekazanego wraz z pismem przewodnim z dnia 17.09.2018 r. Do oceny pracy doktorskiej wzięto również pod uwagę wystąpienia Doktoranta na różnych konferencjach naukowych i seminariach.

### 2. Uzasadnienie celowości podjęcia tematu.

Przekładnie mechaniczne są elementem składowym różnego rodzaju napędów, gdzie zmniejszenie prędkości obrotowej, przy równoczesnym wzroście momentu obrotowego, pozwala uzyskać wymagane parametry pracy urządzenia czy maszyny. Najczęściej proces ten realizowany jest za pomocą przekładni mechanicznej wyposażonej w koła zębata. Szczególnym przypadkiem są przekładnie zębata planetarne bardzo chętnie stosowane w maszynach górniczych ze względu na największe możliwe do uzyskania przełożenie, przy najmniejszych wymiarach zewnętrznych. Zalety te są bardzo ważne przy projektowaniu, a następnie wykonaniu i stosowaniu różnych maszyn górniczych. Jednak środowisko w którym te maszyny pracują ma bardzo destrukcyjny wpływ na nie same ale też w sposób szczególny na przekładnie obiegowe. Związane jest to z dużą zmiennością obciążenia wynikającą z warunków pracy. Jeżeli uwzględni się również czynnik ekonomiczny, czyli koszty wykonania i zakupu przekładni planetarnej, który jest najwyższy z ogólnie dostępnych mechanicznych przekładni zębatach, to łatwo wnioskować, że zasadne są każde czynności pozwalające na zwiększenie ich trwałości i niezawodności oraz obniżenie kosztów wytworzenia i eksploatacji. Uwaga ta odnosi się do każdego cyklu wytworzenia przekładni planetarnej czyli projektowania i wykonania oraz eksploatacji.

Jednym z możliwych sposobów umożliwiających zwiększenie niezawodności i trwałości przekładni planetarnych jest wyrównanie obciążenia zębów kół zębatach, które występuje z różnych przyczyn, tak projektowych, wykonawczych czy też eksploatacyjnych. Oczywiście problem ten występuje również w innych przekładniach zębatach, które narażone są na podobne zjawiska. Jednak w przypadku przekładni planetarnych, a dokładniej stosowanych tam kół zębatach o znacznej szerokości (długości zębów) w relacji do ich średnicy, zjawisko nierównomiernego rozkładu obciążenia nabiera szczególnego i wymiernego znaczenia. Niekorzystny wpływ tego zjawiska można zmniejszyć poprzez zmiany konstrukcyjne samych kół satelitarnych (obiegowych), a dokładniej dzieląc je prostopadle do osi obrotu. Jest to rozwiązanie nowe, zaproponowane i opatentowane przez pracowników Politechniki Śląskiej, obecnie jeszcze

nie stosowane. Stąd zachodzi konieczność przebadania tego rozwiązania i potwierdzenia jego zalet i możliwości zastosowania. W następstwie tego powinno być ustalenie wytycznych projektowania przekładni planetarnych z kołami obiegowymi dzielonymi.

Wspomniane wyżej uwagi, odnoszące się do obecnego stanu wiedzy, a szczególnie wykorzystania kół obiegowych dzielonych dla wyrównania obciążenia ich zębów, pozwalają na pozytywną ocenę wyboru i zasadności podjęcia do realizacji tego tematu jako pracy doktorskiej.

### **3. Ogólna charakterystyka i zakres pracy.**

W oparciu o dotychczasowy stan wiedzy zaczerpnięty z literatury (124 pozycji) oraz opisu patentowego Autor dokonał próby uzasadnienia celowości podjęcia prac związanych z możliwością wykorzystania w przekładniach planetarnych dzielonych kół obiegowych. Sprecyzował również sposób realizacji celu oraz poszczególne etapy.

Dlatego w rozdziale pierwszym krótko scharakteryzował obiekt badań, czyli przekładnie obiegowe, ich wykorzystanie oraz wpływ zmienności obciążenia na ich trwałość, a szczególnie zębów.

Rozdział drugi jest uzasadnieniem celowości podjęcia tematu opartą na analizie dostępnej literatury związanej z przekładniami obiegowymi, obciążeniem kół zębatych, wałów i zębów. Dlatego stwierdził, że przyjmowane wartości obciążenia jako iloczynu obciążenia nominalnego i współczynnika eksploatacyjnego powoduje przewymiarowanie przekładni i tym samym zwiększenie jej masy i wymiarów. Powoduje to często przeszywnienie konstrukcji, co z innymi niedociągnięciami skutkuje nierównomiernym obciążeniem współpracujących zębów. Można temu zjawisku przeciwdziałać różnymi sposobami, a jednym z nich jest podział kół obiegowych. Konstrukcję tego rozwiązania, polegającą na zastąpieniu (prostokątnemu podzieleniu) jednego koła obiegowego dwoma lub kilkoma, których sumaryczna długość odpowiada długości jednego koła, pozwala uelastyczyć ich pracę i tym samym zmniejszyć nierównomierność obciążenia zębów. Stąd konieczność przeprowadzenia badań empirycznych i analitycznych, by ocenić wartość tego rozwiązania.

Rozdział trzeci zawiera cel, zakres i tezę pracy. Sprecyzowano w nim cel pracy jako identyfikacja empiryczna i analityczna rozkładu obciążenia na długości zęba i zębów dla kół obiegowych całych i dzielonych współpracujących z kołem o uzębieniu wewnętrznym. Stąd konieczność przeprowadzenia badań doświadczalnych, budowy stanowiska, układu pomiarowego i realizacji pomiarów, modelowania przekładni i badań symulacyjnych (MES). W następstwie tego możliwa będzie weryfikacja tezy pracy, że szerokość kół zębatych (długość zębów) ma wpływ na rozkład obciążenia wzdłuż linii zęba.

Rozdział czwarty, najbardziej obszerny, zawiera opis przeprowadzonych badań eksperymentalnych wybranej przekładni obiegowej 2K-H kołowrotu EKO-C-7 stanowiącej główny podzespół stanowiska badawczego. Dalsze elementy tego stanowiska to silnik elektryczny z przemiennikiem częstotliwości, przekładnia wstępna, momentomierz, hamulec taśmowy i układ sterowania. Dla pomiaru i rejestracji wielkości mierzonych zaproponowano układ pomiarowy wyposażony w przetworniki do pomiaru sił i momentu oraz rejestrator w postaci komputera (środowisko programowe LabView). Pozwoliło to przeprowadzić badania wstępne (wzorcowanie przetworników), a następnie badania zasadnicze (koło szerokie, koła dzielone, siły obciążające zęby). Sygnały te zostały następnie obrobione dla uzyskania wartości rzeczywistych. Wyniki badań przedstawiono w formie wykresów oraz tabel wraz z komentarzem.

Analizę wyników badań zamieszczono w rozdziale piątym. Dotyczyła ona wpływu szerokości kół (standardowe, dzielone) na obciążenie zębów (zęba) kół obiegowych oraz koła o uzębieniu wewnętrznym. Na podstawie zgromadzonych danych i przedstawionych w formie wykresów liniowych i słupkowych stwierdzono generalnie mniejszą nierówność rozkładu obciążenia wzdłuż linii zęba (zębów) dla kół obiegowych dzielonych. Podobne wnioski nasuwają się analizując współczynnik nierówności rozkładu obciążenia  $K_R$  dla kół obiegowych oraz koła o uzębieniu wewnętrznym i koła centralnego.

W rozdziale szóstym opisano badania wpływu podziału kół obiegowych na obciążenie uzębienia przekładni planetarnej (obiegowej) z wykorzystaniem symulacji komputerowej (MES). Stąd najpierw opracowano uproszczony model bryłowy przekładni (koło obiegowe standardowe, dzielone, koło o uzębieniu wewnętrznym, koło centralne), który poddano walidacji (fragment z trzema zębami-wskaźnik zazębienia). Zaakceptowany model pozwolił na realizację badań symulacyjnych, efektem których były mapy naprężeń i odkształceń. Na podstawie tych danych stwierdzono, podobnie jak w badaniach empirycznych, spadek wartości naprężeń i odkształceń przy współpracy kół przekładni z kołem obiegowym dzielonym (kołami obiegowymi dzielonymi). Również przeprowadzono badania wpływu jakości wykonania kół o uzębieniu wewnętrznym z kołem obiegowym szerokim i dzielonym, zadając błąd dolegania od wartości zerowej do wartości odpowiadającej danej klasie wykonania uzębienia (PN-ISO 1328-1:2000, ISO6336-1:2006). Podobnie, jak wcześniej, koła obiegowe dzielone wywołują mniejsze odkształcenia zstępcze niż koła szerokie, jednak wpływ ich nie jest jednoznaczny. Dla kół wykonanych w najwyższej klasie dokładności (idealnych) wpływ ten jest zerowy.

Rozdział siódmy stanowi podsumowanie pracy oraz zawiera wnioski szczegółowe dotyczące przekładni z kołami obiegowymi dzielonymi.

Całość pracy wraz ze streszczeniem w języku polskim i angielskim oraz załącznikiem i spisem literatury została zawarta na 189 stronach.

#### **4. Ocena merytoryczna pracy.**

Rozprawa doktorska mgr inż. Sławomira Baranowskiego ma charakter pracy analityczno –empirycznej z przewagą tej ostatniej, a jej efektem końcowym jest dokładniejsze poznanie efektywności działania i korzyści z zastosowania nowej konstrukcji przekładni planetarnej (obiegowej) z kołami obiegowymi dzielonymi. Przedmiotowe rozwiązanie jest konstrukcją nową i nie stosowaną obecnie, a przesłanki teoretyczne wskazują, że może przyczynić się do zwiększenia trwałości tych przekładni (rozkład nacisków wzdłuż linii zęba) lub obniżenia kosztów wytwarzania (klasa dokładności wykonania kół zębatych). W przyszłości sugeruje się rozważenie przeprowadzenia badań związanych z efektywnością ekonomiczną przekładni obiegowych z kołami dzielonymi.

Zakres pracy obejmuje omówienie dotychczasowego stanu wiedzy w tym temacie, przeprowadzenie badań analitycznych i eksperymentalnych oraz na ich podstawie ocenę wpływu zastosowania dzielonych kół obiegowych na obciążenie ich zębów, a przypuszczalnie na ich trwałość. Podobnie jak poprzednio sugeruje się w przyszłości przeprowadzenie badań empirycznych dla oceny wpływu tego rozwiązania konstrukcyjnego na trwałość przekładni obiegowych.

Prace Autor poprzedził rozeznaniem literatury z dziedziny dotyczącej tematu. Dobór literatury, na który powołuje się Autor w tekście należy uznać za trafny, tym bardziej, że wykorzystał informacje związane z stosowanymi obecnie mechanicznymi przekładniami zębatymi dla uzasadnienia przeprowadzenia badań nowej konstrukcji

przekładni planetarnej. Należy to podkreślić, gdyż do tej chwili to rozwiązanie konstrukcyjne nie było stosowane, a efekty mogły okazać się iluzoryczne.

Cel pracy założony przez Autora został osiągnięty w całości, pomimo przeprowadzenia trudnych badań eksperymentalnych i analitycznych. Podobnie teza pracy została również obroniona.

Autor przeprowadził badania najpierw empiryczne, a następnie analityczne przekładni obiegowej z kołami obiegowymi szerokimi i dzielonymi.

Do badań empirycznych wykorzystał przekładnie obiegową typu 2K-H kołowrotu Eko-C-7 ze standartowymi kołami obiegowymi oraz dzielonymi. Brak jest tu jednak dokładniejszych danych związanych z parametrami konstrukcyjnymi kół zębatych standartowych, a szczególnie dzielonych. Można się jedynie domyślać, że zostały wykonane tak samo (wymiary, materiał, obróbka cieplna). Wspomniano wcześniej, że przekładnia obiegowa stanowi jeden z elementów stanowiska badawczego, które zostało zaprojektowane i wykonane w celu przeprowadzenia badań porównawczych. Temu celowi podporządkowano również układ pomiarowy oraz całą procedurę badań. Jest to nie wątpliwie duże osiągnięcie doktoranta. Jednak w pracy pojawiły się niedociągnięcia związane z niedokładnym opisem prowadzenia eksperymentu (metodyka i plan badań, moment oporu, a hamulec taśmowy). Elementy te występują w pracy, ale w formie rozproszonej, co utrudnia jej ocenę.

Przeprowadzone badania oraz ich opracowanie stanowią oryginalny dorobek autora, umożliwiający ocenę obciążenia zębów kół obiegowych, szczególnie nowej konstrukcji czyli dzielonych. Pozwala to na pozytywną ocenę, na tym etapie, nowej konstrukcji przekładni obiegowej. Sugeruje się, co wspomniano wcześniej, wykorzystanie tego stanowiska do dalszych badań tej nowej postaci konstrukcyjnej przekładni planetarnej (obiegowej) w kierunku oceny jej trwałości i dokładniejszemu sprecyzowaniu wytycznych w jej projektowaniu.

Wyniki badań empirycznych wykorzystano do oceny modelu i wyników symulacji komputerowej wykorzystującej MES. Jest to dodatkowe narzędzie pozwalające na etapie projektowania oszacować wpływ parametrów konstrukcyjnych i kinematycznych przekładni, a szczególnie uzębienia, na ich wyteżenie (naprężenia, odkształcenia). Można zalecać wykorzystanie tego oprogramowania w procesie projektowania przekładni obiegowych.

Mając na uwadze złożoność zjawisk występujących w czasie pracy przekładni planetarnej oraz trudności metodologiczne i techniczne w pomiarze obciążeń, jak również sposób prowadzenia eksperymentu i opracowanie oraz analizę wyników badań, to można pozytywnie ocenić umiejętności i samodzielność Doktoranta.

Należy jednocześnie zaznaczyć, że praca, od strony edytorskiej, została przygotowana bardzo starannie z niewielką ilością trudno zauważalnych błędów, które przekazano oddzielnie Doktorantowi.

## **5. Uwagi końcowe.**

Praca doktorska mgr inż. Sławomira Baranowskiego stanowi oryginalny dorobek Autora o charakterze naukowym i wnosi dostateczny wkład w dziedzinę dotyczącą projektowania, konstruowania i eksploatacji mechanicznych przekładni zębatych, a szczególnie przekładni planetarnych.

Na podstawie przeprowadzonej przez Doktoranta analizy prac badawczych z tej dziedziny i oceniając sposób rozwiązania postawionego zagadnienia można stwierdzić, że Autor



wykazuje wystarczającą samodzielność i dostateczny stopień wiedzy w dziedzinie Nauk Technicznych w zakresie dyscypliny naukowej Budowa i eksploatacja maszyn, której rozprawa dotyczy.

Biorąc pod uwagę wszystkie cechy oryginalności pracy, wystarczającą samodzielność Autora w realizacji pracy, stwierdzam, że przedstawiona do oceny praca mgr inż. Sławomira Baranowskiego pt. „*Wpływ podziału i szerokości kół zębatach na obciążenie uzębienia przekładni planetarnej*” spełnia wymagania Ustawy o Tytule Naukowym i Stopniach Naukowych z dnia 14 marca 2003 roku, stawianych rozprawom doktorskim i wnoszę o jej przyjęcie oraz dopuszczenie do publicznej obrony.



Krzysztof Krauze