

dr hab. inż. Piotr Skawiński, prof. PW
Zakład Technik Wytwarzania
Instytut Podstaw Budowy Maszyn
Politechnika Warszawska
ul. Narbutta 84
02-524 Warszawa
tel: 22- 849-03-01
e-mail: psk@simr.pw.edu.pl

Warszawa, 26.06.2017

RECENZJA
rozprawy doktorskiej
mgr inż. Piotra Połowniaka

**Modelowanie i analiza śladu styku w globoidalnych przekładniach
ślimakowych**

Podstawa opracowania

Pismo Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej prof. dr hab. inż. Jarosława Sępa, z dnia 11 maja 2017r. o numerze RM-530-8-03-2017 na podstawie decyzji Rady Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa z dnia 10 maja 2017 roku.

1. Temat rozprawy doktorskiej

Przekładnie ślimakowe jako jedno z wielu mechanicznych układów napędowych są przedmiotem zainteresowań wielu ośrodków naukowych i badaczy, mimo iż są wytwarzane i stosowane w budowie maszyn od ponad stulecia. Wysokie wymagania stawiane przekładniom zębatym jak np. sprawność, trwałość i cichobieżność skłaniają badaczy do podejmowania kolejnych wyzwań mających na celu poprawę ich cech konstrukcyjnych, technologicznych i eksploatacyjnych. Problematyka ta dotyczy również przekładni ślimakowych mających szerokie zastosowanie tam gdzie konieczne jest wykorzystanie m. inn. wchrowatości osi i wysokiej redukcyjności. Bogata literatura krajowa i zagraniczna w zakresie przekładni ślimakowych koncentruje się najczęściej nad badaniami przekładni ślimakowych globoidalnych. Cechy konstrukcyjne przekładni ślimakowej globoidalnej związane z jej złożoną geometrią, większa nośność w porównaniu do przekładni ślimakowej walcowej, a także dobre warunki przylegania zębów, korzystne warunki smarowania zachęcają badaczy do zajmowania się tą tematyką zwłaszcza, że coraz w szerszym zakresie wykorzystujemy dostępne oprogramowanie z obszaru komputerowego wspomaganie prac inżynierskich CAD, CAM i CAE. Dokonując analizy literatury, Autor rozprawy dostrzega obszary wymagające uzupełniających badań w szczególności metodologii modelowania całej przekładni w środowisku programów CAD. Autor wskazuje również na niezdefiniowanie w dostępnej literaturze matematycznego opisu boku zęba ślimacznicy jak i analizy śladu współpracy zębów przekładni ślimakowej globoidalnej. Zauważa też brak analizy śladu styku

wykorzystującej środowisko programów MES. Uwzględniając powyższe Autor formułuje cele rozprawy którymi są:

- opracowanie metodologii modelowania matematycznego i modelowania w środowisku CAD kół zębatach tworzących przekładnię ślimakową globoidalną,

- opracowanie metodologii wyznaczania śladu styku metodami matematycznymi, metodami wykorzystującymi środowisko CAD i MES, w tym także metody szybkiego prototypowania weryfikujące eksperymentalnie modele CAD,

- wyznaczenie dla różnych geometrii przekładni śladu styku będącego jakościowym wskaźnikiem poprawności pracy przekładni, w tym wpływu geometrii przekładni na ślad współpracy.

Cele te przekładają się na wyszczególniony w rozprawie szeroki badawczy zakres pracy (przedstawiony na stronie 17), a praktycznym celem jest aplikacja zwiększenia uciążu wyciągarki linowej z przekładnią ślimakową zachowującej gabaryty przekładni KTO Rosomak.

Uwzględniając powyższe i zaprezentowane na stronie 157 rozprawy kierunki dalszych badań uważam, że jej tematyka, cele i zakres są wybrane bardzo trafnie.

Temat rozprawy jest więc zatem wybrany właściwie, a rozważone w niej zagadnienia dotyczące modelowania matematycznego, modelowania w środowisku CAD, analizy śladu styku mają istotne znaczenie teoretyczne i praktyczne.

2. Omówienie rozprawy

Praca została podzielona na 10 rozdziałów. Rozprawę otwiera wstęp (rozdział 1) uzasadniający podjęcie tematyki przekładni ślimakowych globoidalnych, jej genezę, cel i zakres pracy oraz przegląd literatury. Zaprezentowany przegląd literatury stanowi tło na którym Doktorant formułuje cele pracy, które mają być osiągnięte przy zdefiniowanym zakresie rozprawy.

Rozdział drugi to geometria zazębienia przekładni ślimakowej globoidalnej kończąca się geometrycznym modelem zazębienia. Kolejno przedstawiane są podstawowe pojęcia dotyczące przekładni ślimakowej globoidalnej, wymiary uzębienia i geometria przekładni, a przede wszystkim zwracający uwagę geometryczny model zazębienia. W modelu tym wykorzystano jednorodne macierze transformacji 4x4. Rozważania dotyczące geometrii zazębienia ilustrowane są czytelnie wykonanymi rysunkami.

W rozdziale trzecim Doktorant definiuje model matematyczny ślimaka przekładni ślimakowej globoidalnej na podstawie równania analitycznego globoidalnej linii śrubowej oraz równania parametrycznego zarysu zęba. Model matematyczny ślimaka globoidalnego zapisano dla zarysu zęba prostoliniowego i nieprostoliniowego. W rozdziale tym Autor zdefiniował model ślimaka wykonany przez symulację obróbki stożkowym narzędziem trzpieniowym, wcześniej narzucając wytyczne dla modelu roboczego i obróbkowego.

Rozdział 4 to matematyczny model ślimacznicy przekładni ślimakowej globoidalnej zaprezentowany dla dwóch przypadków: dla narzędzia o zarysie prostoliniowym i dla narzędzia o zarysie nieprosto liniowym (wklęsłym lub wypukłym). Modele matematyczne zbudowano wykorzystując warunek zazębienia i jednorodne macierze transformacji. Rozważania zilustrowano rysunkami przedstawiającymi m. inn. regiony i powierzchnie boku zęba ślimacznicy przekładni ślimakowej globoidalnej. Algorytmy modelowania matematycznego wykonano w programie MATLAB R2013a.

Rozdział 5 zawiera opis sposobu modelowania ślimaka przekładni ślimakowej globoidalnej w środowisku CAD (CATIA V5 R21 oraz AutoCAD 2014 – analizy geometryczne). Wspierając się obliczeniami z programu MATLAB funkcjami i poleceniami środowiska CAD zamodelowano powierzchnie boczne ślimaka globoidalnego zwracając uwagę na kształtowanie wyjścia zwoju ślimaka. Rozdział ten zawiera również modelowanie w środowisku CAD zwoju ślimaka globoidalnego stożkopochodnego. Jednakże na szczególną uwagę zasługuje przedstawiony sposób modelowania w środowisku CAD zwoju ślimaka z wykorzystaniem modelu matematycznego, a także symulacji kinematycznej.

W rozdziale 6 Doktorant przedstawia sposób modelowania zębów ślimacznicy w środowisku systemów CAD. Do kształtowania zębów ślimacznicy wykorzystano bryłowy model ślimaka obróbkowego. Rozdział szczegółowo opisuje kolejne fazy modelowania uzębienia ślimacznicy bogato ilustrowane rysunkami (zrzuty ekranów). Zajęto się także modelowaniem w środowisku CAD z wykorzystaniem wcześniej opracowanego modelu matematycznego ślimacznicy. Rozdział kończą wnioski dotyczące grubości warstwy skrawanej generowaną przez skrajną krawędź skrawającą narzędzia dla zarysu prostoliniowego, wklęsłego i wypukłego z ciekawą konkluzją dotyczącą kosztów wykonania narzędzia w odniesieniu do produkcji jednostkowej i małoseryjnej.

Rozdział 7 dotyczy metod wyznaczania geometrycznego śladu styku (położenie, kształt i pole powierzchni) przekładni ślimakowej globoidalnej. W pierwszej kolejności przedstawiono metodę analityczno-numeryczną opartą o model matematyczny ślimaka roboczego oraz model matematyczny ślimacznicy kształtowanej ślimakiem obróbkowym. Rozważania przeprowadzono dla zarysu prostoliniowego ślimaka, wklęsłego i wypukłego bogato ilustrując rysunkami. W rozdziale 7 zajęto się także wyznaczaniem śladu styku wykorzystując środowisko CAD. Zgodność obserwowanego śladu styku zaprezentowanego oboma metodami świadczy o poprawności przyjętych rozwiązań. Ważnym, choć krótkim podrozdziałem wykorzystującym środowisko CAD, jest analiza wpływu błędów montażu na ślad styku. Szkoda, że Autor szerzej nie skomentował wyników analiz.

Badanie śladu styku metodą elementów skończonych (środowisko Abaqus) przedstawiono w rozdziale 8. Zaimportowane modele CAD poddano analizie numerycznej otrzymując zgodność chwilowego śladu styku z wyznaczonym metodą analityczno-numeryczną oraz metodą z wykorzystaniem środowiska CAD.

Rozdział 9 dotyczy badań modelowych przekładni ślimakowej. Badania te przeprowadzono na stanowisku zaprojektowanym pod przekładnię ślimakową montowaną w wyciągarce linowej pojazdu Rosomak. Na stanowisku zamontowano ślimak globoidalny i część uzębioną ślimacznicy wykonanymi metodami szybkiego prototypowania. Szkoda, że Autor nie zamieścił obrazów otrzymanych śladów styku (śladów współpracy) choćby dla jednego z proponowanych sposobów badań.

Do chyba najciekawszych rozdziałów rozprawy należy rozdział 10 dotyczący analizy wyników badań śladu styku przekładni ślimakowej globoidalnej. Dla przykładowej przekładni przedstawiono analizę wyników badań śladu styku wykonanego metodą analityczno-numeryczną dla zarysu prostoliniowego i łukowego (wklęsłego i wypukłego) zęba ślimaka. Bogata ilustracja wykresami dotyczącymi pola powierzchni śladu styku jak i chwilowego śladu styku w układzie ślimaka stanowią wartość dodaną rozprawy. Rozdział ten zawiera również analizę wyników badań śladu styku wykonanego z wykorzystaniem

środowiska CAD. Konkluzja zawarta w podsumowaniu tego rozdziału zwraca uwagę na zgodny charakter uzyskanych śladów styku (kształt i wielkość) z uzyskanymi metodą analityczno-numeryczną.

Podrozdział 10.3 odnosi się do analizy wyników badań wpływu błędów montażu na ślad styku. Badania prowadzono w środowisku programu CAD uwzględniając błędy wykonawcze korpusu. Obszernie zaprezentowane wyniki badań zmierzają do wniosków, że niepoprawne osiowe ustawienie ślimaka może mieć znaczący wpływ na kształt i wielkość chwilowych śladów styku, co przekłada się na nośność przekładni. Jednakże i tu trzeba zgodzić się z Autorem, iż najbardziej niekorzystną jest odchyłka odległości osi, która w przeciwieństwie do błędów ustawień osiowych ślimaka i ślimacznicy jest niemożliwa do skorygowania. Wielkość śladu styku znacząco maleje.

Podrozdział 10.4 przedstawia analizę wyników badań śladu styku wykonaną metodami elementów skończonych. W środowisku, jak należy się domyślać programu Abaqus, przeprowadzono analizę śladu styku tej samej przekładni przy obciążeniu zadany momentem (400 Nm). Graficzna ilustracja wyników (ślady styku) świadczą o zbieżności z rezultatami otrzymanymi metodą z wykorzystaniem środowiska CAD, jak i analityczno-numeryczną.

Rozdział 10 kończy analiza wyników badań śladu styku wykonana na stanowisku badawczym modelu przekładni wykonanej technikami szybkiego prototypowania. Zamieszczone ilustracje, oczywiście z zastrzeżeniem iż są to badania modelowe, potwierdzają zgodny charakter poszczególnych śladów styku ze śladami prezentowanymi we wcześniejszych metodach badawczych (podrozdziały 10.1 do 10.4).

Rozdział 11 to wnioski i kierunki dalszych badań. W formie schematów blokowych przedstawiono sposoby modelowania kół zębatach przekładni ślimakowej globoidalnej jak i sposoby analizy styku zębów, komentując je we wnioskach ogólnych. Ważne moim zdaniem są wnioski użytkarckie, gdyż odnoszą się wprost do konstrukcji, technologii i montażu przekładni ślimakowych globoidalnych. Zaproponowane kierunki dalszych prac są logiczną kontynuacją zaprezentowanych w rozprawie rozważań, analiz, badań i aplikacji.

2. Uwagi szczegółowe

Recenzowana rozprawa jest poprawna merytorycznie, w szczególności przywołując zastosowany aparat matematyczny. Prawidłowo i właściwie zastosowano metody badawcze. Rozprawa nie jest wolna od uchybień, niekiedy niejednoznacznych sformułowań czy też wręcz usterek edycyjnych. Dość często Autor używa sformułowania „modelowanie CAD” np. „Modelowanie CAD zwoju ślimaka z wykorzystaniem modelu matematycznego”. Jest to moim zdaniem zbyt duże uproszczenie. Występuje modelowanie bryłowe, powierzchniowe, itp. w środowisku systemu komputerowego CAD. Poprawniej byłoby użycie sformułowania np. *Modelowanie w środowisku CAD zwoju ślimaka z wykorzystaniem modelu matematycznego*. W innym miejscu pracy (str.106, 108) można znaleźć inne sformułowanie ... *metodą bezpośrednią CAD*, .. *metoda CAD*... Co oznaczają te określenia? Tak samo wymaga wyjaśnienia użycie w tytule podrozdziału 7.1.1 zwrotu ... *przekładni ślimakowej globoidalnej prostoliniowej*. Na str. 116 w tytule podrozdziału winno być *Drukowanie modeli...*, a nie *Druk modeli...* Nie powinno rozpoczynać się zdania od symbolu np. str. 28, 8 wiersz od góry: φ_1 jest parametrem geometrycznym... Winno być: *Kąt φ_1 jest parametrem*

geometrycznym... Dla pełnej jasności równania 3.2 str. 31 warto zdefiniować macierze M_{12} i M_{21} . Niezręcznie jest użycie określenia że ... *powierzchnia boczna jest definiowana znamionowym zarysem narzędzia*.... Co to znaczy znamionowy zarys? Na str. 36 i 39 poprawniej językowo byłoby .. *zostanie wprowadzone do wyrażenia/macierzy*... W tytułach rozdziału i podrozdziałów (rozdział 10, podrozdział 10.1, 10.2 i kolejne) brakuje słowa *badania*.

Doktorant przedstawił trafne wnioski końcowe i kierunki dalszych badań. Te ostatnie będą wymagały badań stanowiskowych na rzeczywistej przekładni, zwłaszcza badanie wpływu nieprostoliniowego (wklęsłego/wypukłego) i prostoliniowego zarysu na utrzymanie klina smarowego. Inne, bardzo szczegółowe uwagi edycyjne nie wymagające formalnego zapisu w recenzji zostaną przekazane bezpośrednio Autorowi.

3. Ocena ogólna rozprawy doktorskiej

Recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Piotra Połowniaka pt. „Modelowanie i analiza śladu styku w globoidalnych przekładniach ślimakowych” ujmuje kompleksowo zagadnienia związane z procesem modelowania ślimaka globoidalnego i ślimacznicy angażując aparat matematyczny, środowisko systemów CAD i MES. Do najważniejszych osiągnięć recenzowanej rozprawy należy:

- opracowanie modelu matematycznego ślimaka o zarysie prostoliniowym i nieprostoliniowym przekładni ślimakowej globoidalnej, w tym kształtowanego stożkowym narzędziem trzpieniowym,
- opracowanie modelu matematycznego ślimacznicy kształtowanej narzędziem o zarysie prostoliniowym i nieprostoliniowym przekładni ślimakowej globoidalnej,
- modelowanie w środowisku CAD zwoju ślimaka z wykorzystaniem modelu matematycznego,
- generowanie w środowisku systemu CAD zwoju ślimaka globoidalnego z wykorzystaniem symulacji kinematycznej,
- wyznaczenie śladu styku metodą analityczno-numeryczną, metodą z wykorzystaniem środowiska systemów CAD, a także metodą elementów skończonych,
- badania modelowe przekładni ślimakowej globoidalnej oraz analiza wyników badań śladu styku przekładni ślimakowej globoidalnej.

Praca została zaprezentowana na 168 stronach. Literatura cytowana w pracy obejmuje 109 pozycji ze źródeł krajowych i zagranicznych w tym również opracowania autorskie (2 publikacje) i 9 współautorskich Doktoranta związane z tematyką rozprawy.

4. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska „Modelowanie i analiza śladu styku w globoidalnych przekładniach ślimakowych” 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. Piotra Połowniaka do publicznej obrony, a po jej pozytywnym przebiegu o nadanie stopnia doktora nauk technicznych.

Piotr Skarżyski