

*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, 18.03.2015

**RECENZJA**  
**rozprawy doktorskiej**  
*mgr inż. Bartłomieja Sobolewskiego*

**MODELOWANIE I ANALIZA ZAZĘBIENIA PRZEKŁADNI**  
**STOŻKOWYCH W ŚRODOWISKU CAD**

**Podstawa opracowania**

Pismo Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej prof. dr hab. inż. Jarosława Sępa, z dnia 13 marca 2015r o numerze RM-530-10-02-2015 na podstawie decyzji Rady Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa z dnia 11 marca 2015 roku.

**1. Temat rozprawy doktorskiej**

Podjęty przez Doktoranta temat dotyczący modelowania i analizy zazębienia przekładni stożkowych w środowisku zaawansowanych systemów CAD, należy do grupy problemów bardzo ważnych poznawczo i użytkowo. Jest to podyktowane koniecznością wytwarzania stożkowych kół zębatach o coraz wyższej jakości przy jednoczesnym obniżaniu kosztów produkcji.

Przedstawione w pracy doktorskiej zagadnienie dotyczy problemów związanych z wykorzystaniem zaawansowanych systemów wspomagania projektowania w procesie projektowania i wdrażania do produkcji przekładni stożkowych. Problematyka ta wynika z zapotrzebowania przemysłu na opracowanie ogólnodostępnej metody modelowania i analizy zazębienia kół zębatach stożkowych będącej alternatywą dla stosowania specjalizowanych systemów obliczeniowych dostarczanych przez producentów obrabiarek.

Określenie wyznaczników poprawności współpracy przekładni stożkowych z zastosowaniem zaawansowanych systemów CAD w dobie dynamicznego rozwoju systemów komputerowego wspomagania prac inżynierskich jest niezbędnym elementem systemów produkcyjnych. Rozwój i wprowadzanie przez producentów na rynek coraz nowszych urządzeń w których konstrukcji wykorzystuje się przekładnie stożkowe, poszerza ilość potencjalnych odbiorców tego rodzaju przekładni, produkowanych zarówno na potrzeby tzw. pierwszego montażu jak i jako części zamienne. Uwzględniając fakt, że wdrożenie do produkcji nowej przekładni wymaga posiadania specjalistycznego systemu projektowania lub zakupu technologii oraz wykonania szeregu par kół badawczych i przeprowadzenia testów. Wiąże się to z koniecznością poniesienia znacznych wydatków. Z tego powodu uzasadnione jest poszukiwanie innowacyjnych rozwiązań dotyczących modelowania i analizy zazębienia, umożliwiające przeprowadzenie niezbędnych badań wstępnych w środowisku wirtualnym

minimalizując tym samym ilość prób wykonywanych w warunkach rzeczywistych. Wymusza to konieczność prowadzenia badań dotyczących możliwości zastosowania systemów wspomagania projektowania do modelowania i analizy ząbienia w środowisku CAD.

Możliwość wykonania modeli bryłowych oraz przeprowadzenia analizy ząbienia z wykorzystaniem uniwersalnego narzędzia, jakim są systemy CAD zapewni wymierne efekty w postaci umożliwienia weryfikacji poprawności projektowanych kół zębatych bez konieczności zakupu drogich systemów specjalizowanych jest znaczącym ułatwieniem dla sektora MSP (dysponującym ograniczonymi środkami finansowymi). Producenci posiadając często uniwersalne systemy CAD, nie podejmują działań związanych z ich adaptacją dla modelowania i analiz ząbienia niezbędnych w procesie projektowania stożkowych kół zębatych, co jest wynikiem ograniczonych środków na prowadzenia badań związanych z poszukiwaniem alternatywnych rozwiązań oraz złożonością tego typu zagadnienia. W efekcie powoduje to, w połączeniu z określonym budżetem firm, ograniczenia dotyczące rozszerzania zakresu produkcji. Z tych względów opracowania metod i procedur modelowania i analizy ząbienia może przynieść wymierne pozytywne skutki ekonomiczne dla sektora MSP.

Przedsiębiorstwa często posiadają już maszyny i urządzenia umożliwiające produkcję przekładni stożkowych, często jednak nie mają możliwości wprowadzenia nowego wyrobu ze względu na ograniczone możliwości projektowania i prowadzenia wstępnych analiz. Przez co nie w pełni wykorzystują możliwości produkcyjne.

Uwzględniając aktualne potrzeby przemysłu podjęta tematyka rozprawy doktorskiej wpisuje się w bieżącą tendencję rozwoju współpracy nauki z przemysłem, a celami operacyjnymi RSI jest wspieranie powstawania nowych specjalizacji sektora B+R, jak również dostosowanie do potrzeb przedsiębiorstw oferty szkoleniowo-doradczej w zakresie innowacji oraz rozwój innowacyjnych usług. Z tego względu celowe jest prowadzenie przez Doktoranta prac badawczych nad opracowaniem metod generowania modeli kół zębatych oraz przeprowadzenia analizy ząbienia w środowisku CAD.

W rozprawie podjęto aktualny i ważny z naukowego i praktycznego punktu widzenia problem opracowania metod i procedur umożliwiających wykonanie modeli bryłowych i późniejsze przeprowadzenie analizy ząbienia w środowisku ogólnodostępnego systemu wspomagania projektowania z uwzględnieniem osiąganych dokładności oraz występujących ograniczeń.

Tym zagadnieniom poświęcona jest recenzowana praca. Uwzględniając powyższy opis, jej tematyka, cele i zakres są wybrane bardzo trafnie.

**Temat rozprawy jest więc zatem wybrany właściwie, a rozważone w niej zagadnienia dotyczące modelowania i analizy ząbienia przekładni stożkowych mają istotne znaczenie teoretyczne i praktyczne.**

## **2. Omówienie rozprawy**

Praca została podzielona na 7 rozdziałów. Całość otwiera wprowadzenie opisujące wykorzystanie przekładni stożkowych w przemyśle, ze szczególnym uwzględnieniem wykorzystania przekładni stożkowych w przemyśle lotniczym

W pierwszym rozdziale przedstawiono zagadnienia związane z projektowaniem i wytwarzaniem przekładni stożkowych ze szczególnym uwzględnieniem metod firm Gleason i Klingenberg-Oerlikon. Przedstawiono podstawowe metody i systemy wspomagające projektowanie przekładni stożkowych. Uwzględniono również stosowane w praktyce sposoby analizy ząbienia przekładni.

W rozdziale drugim przedstawiono analizę literatury związanej z podjętymi zagadnieniami. Autor omówił i poddał analizie publikacje dotyczące problematyki modelowania uzębienia w środowisku CAD oraz dotyczące analizy ząbienia zarówno w

środowisku systemów wspomagania projektowania jak i przy wykorzystaniu metod matematycznych opartych o równanie ząbienia.

W trzecim rozdziale Autor formułuje tezę, że „Zaawansowany system CAD jest odpowiednim narzędziem do modelowania geometrii i przeprowadzenia analizy współpracy przekładni stożkowych”. Autor przedstawił temat pracy, zasadność jego podjęcia oraz jej zakres.

W rozdziale czwartym Doktorant przedstawia zagadnienia związane z opracowaniem modeli 3D kół zębatach przekładni stożkowych w środowisku CAD. Doktorant omawia kinematykę procesu kształtowania uzębienia oraz opisuje ruchy robocze klasycznych frezarek systemu Gleason, a następnie przedstawia przyjęty sposób odwzorowania układu roboczego obrabiarek definiując jednocześnie geometrię przedmiotu obrabianego i narzędzia. W kolejnej części rozdziału przedstawiono sposób generowania modeli bryłowych kół zębatach przekładni stożkowych metodą symulacji obróbki, przyjmując za punkt wyjścia technologiczne ustawienia bazowe wirtualnej obrabiarki. Modele bryłowe wykonano z wykorzystaniem środowiska trzech różnych systemów CAD: AutoCAD, Inventor i Catia.

Dalsza część rozważań zawartych w rozdziale poświęcono określeniu dokładności odwzorowania powierzchni wrębów uzyskanych na drodze symulacji obróbki w odniesieniu do modelu matematycznego.

W piątym najobszerniejszym rozdziale Doktorant przedstawia zagadnienie wygładzania graniastych powierzchni bocznych zęba uzyskiwanych w wyniku symulacji obróbki, uzasadniając jednocześnie celowość prowadzenia tej operacji. W rozdziale tym zamieszczono również podstawowe informacje z zakresu generowania krzywych i powierzchni w systemach CAD.

Dalszą część rozdziału stanowi opis wykorzystanych metod wygładzania współpracujących powierzchni zębów z uwzględnieniem procedur generowania profili i powierzchni. W końcowej części rozdziału piątego Doktorant przedstawił proponowane sposoby wygładzania dna wrębu wraz z powierzchnią przejściową. Rozdział piąty zamyka opis wykorzystania wygładzonej powierzchni do generowania modeli bryłowych kół zębatach przekładni stożkowych.

W rozdziale szóstym Autor przedstawia autorską metodę prowadzenia analizy ząbienia w środowisku CAD, nazwaną przez Doktoranta metodą z elementem pośrednim. Metoda ta pozwala przy wykorzystaniu specyfiki systemu Inventor na przeprowadzenie analizy ząbienia z odwzorowaniem rzeczywistego przełożenia. W nowatorski sposób rozwiązano problem wyznaczania punktu styku. Opracowana procedura pozwala na generowanie linii ząbienia na powierzchniach bocznych współpracujących zębów, chwilowych oraz sumarycznych śladów współpracy i linii przyporu. Procedura umożliwia równocześnie wygenerowanie wykresów ruchowych ważnych z punktu widzenia dokładności kinematycznej pary zębatej. Ostatnia część rozdziału przedstawia wyniki analiz mających na celu zweryfikowanie poprawności wyników uzyskiwanych za pomocą opracowanej metody. Uzyskane wyniki Doktorant porównał z wynikami uzyskiwanymi za pomocą modelu matematycznego wykorzystującego równanie ząbienia, a także z wynikami wygenerowanymi za pomocą oprogramowania specjalistycznego.

Ostatni, siódmy rozdział pracy zawiera podsumowanie wyników uzyskanych w badaniach w świetle wcześniej postawionych tez, wnioski wynikające z pracy oraz zarysowanie kierunków dalszych badań. Cały materiał jak już wspominałem jest bogato ilustrowany.

## 2. Uwagi szczegółowe

Recenzowana praca poprawna od strony merytorycznej i zastosowanych metod badawczych, nie jest wolna od uchybień, niekiedy niejednoznacznych sformułowań czy też wręcz usterek edycyjnych. Na stronie 9 Autor pisze: „*Ujawnione błędy w kształcie i położeniu śladu współpracy wymagają nowych obliczeń technologicznych*” tak, ale w przypadku gdy są nieskuteczne poprawki I rzędu (operatorskie) i II rzędu, wtedy rzeczywiście konieczne są nowe obliczenia nie tylko z powodu diamentowości śladu współpracy, ale np. z racji niedopasowania stożków generujących i powstania tzw. uskoku na dnie wrębu zębniaka. Nie zgadzam się też ze stwierdzeniem (str.9), iż „*Ostateczne korygowanie geometrii kół dla otrzymania poprawnego zazębienia następuje w procesie docierania (dotyczy kół frezowanych)*”. Proces docierania ma za zadanie zmniejszyć chropowatość powierzchni bocznych współpracujących zębów, niejako „dopasować” je do siebie, zaś nigdy nie jest w stanie skorygować geometrii kół czy też topografii boku zęba. Na stronie 13 do stwierdzenia: „*generowanie danych dla szlifierek do noży*” warto dodać „*noży sztabkowych*”, gdyż jedynie te wymagają wyznaczenia obliczanych (programy komputerowe) wg złożonych formuł wielu wielkości ustawczych szlifiarki-ostrzarki, bo noże zataczane ostrzone są tylko po powierzchni natarcia i ustawienie maszyny jest stosunkowo proste. Strona 13 - „*koła systemu Klingelnera mają ewolwentową linię zęba*”, tak, ale tylko wykonywane metodą palleid, zaś w pozostałych metodach (Cyklopalleid i Cyklomet) mają epicykloidalną linię zęba. Wymieniając metody obróbki przekładni stożkowych systemu Gleason'a (str.16) Autor pisze: „*Spiral Generated Tilt – z pochyleniem wrzeciona narzędziowego dla regulacji śladu współpracy*”, warto przede wszystkim dodać: do zbudowania naturalnego układu kształtującego uzębienie zębniaka, czyli obróbki zębniaka wygenerowanym kołem talerzowym. Na tej samej stronie Doktorant pisze, iż system Klingelnera obejmuje tylko metody obwodniowe z podziałem ciągłym i wymienia m. inn. metody Spiromatic N, Spiromatic G, Spiroflex. Są to przecież metody Oerlikona. Na wielu stronach Autor naprzemiennie stosuje określenie „*stół wrzeciona*” (prawidłowo stół wrzeciennika przedmiotu obrabianego) i „*support*”. O ile można jeszcze zaakceptować określenie „*stół wrzeciona*”, to w żadnym przypadku support. W rozdziale 4.1. „*Odwzorowanie układu obróbczego*”, koniecznie trzeba uzupełnić zdanie na str.23: „*...kołyska pozostaje nieruchoma w przypadku nacinania uzębienia koła bez odtaczania – Formate*”. Skorygowania wymaga rys. 4.3 ilustrujący ustawienie głowicy frezowej do nacinania zębniaków/kół dla lewego i prawego kierunku pochylenia osi wrzeciona narzędziowego. W tabeli 4.1 poza niezręcznym sformułowaniem „*kąt skrócenia wrzeciona*” (winno być: kąt skrócenia wrzeciennika przedmiotowego) należy też w ustawieniach bazowych obrabiarki (nazwa czwartej kolumny) wpisać „*wypukła strona boku zębniaka*”. W podrozdziale 4.3 „*Przeprowadzenie symulacji obróbki*” zamieszczono kilkanaście rysunków z programu GOM ilustrujących rozkłady odchyłek na powierzchni boku zęba badanych modeli wygenerowanych w analizowanych systemach CAD, jednakże są one mało czytelne. Taka sama uwaga dotyczy kolejnego podrozdziału, w którym Doktorant prezentuje dokładność odwzorowania modeli. Również ważne z punktu widzenia merytorycznego i edycyjnego rysunki są mało czytelne. Ciekawe, choć wymagające bardziej dokładnego opisu i skomentowania są rysunki w podrozdziale 5.2.1. „*Generowanie punktów i profili*”, przede wszystkim dotyczące analizy krzywizn. Zamieszczone w pracy rysunki, zwłaszcza te, które ilustrują rozkłady odchyłek (rozdział 5), z racji małej czytelności (przede wszystkim wielkość czcionki) utrudniają analizowanie tak ważnych przecież wyników badań prowadzonych w środowiskach systemów CAD. Moim zdaniem trochę mało precyzyjny jest opis ciekawej metody z elementem pośrednim poszukiwania wspólnego punktu styku współpracujących powierzchni (środowisko CAD Inventor), w rezultacie pozwalającego wyznaczyć ścieżki styku, linie przyporu, wykresy ruchowe i sumaryczny ślad współpracy.

W rozdziale 6.5 „Określenie poprawności wyników” warto na rys. 6.12.b ustawić szkic zęba w odwrotnym kierunku (toe, heel), by móc bezpośrednio porównać wyniki lokalizacji śladu w systemie CAD i programie KIMOS. Zbyt skrótowo Autor zaprezentował kierunki dalszych badań, choć nie można w żadnym przypadku kwestionować postawionego celu. Inne, bardzo szczegółowe uwagi jak tzw. literówki, styl, uwagi edycyjne nie wymagające formalnego zapisu w recenzji przekazano bezpośrednio Autorowi.

### **3. Ocena ogólna rozprawy doktorskiej**

Recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Bartłomieja Sobolewskiego pt. „Modelowanie i analiza ząbienia przekładni stożkowych w środowisku CAD” ujmuje kompleksowo zagadnienia związane z procesem modelowania geometrii oraz analizy ząbienia przekładni stożkowych. Praca została zaprezentowana na 119 stronach, zawiera 121 rysunków 2 tabele. Literatura cytowana w pracy obejmuje 67 pozycji ze źródeł krajowych i zagranicznych w tym również opracowania współautorskie Doktoranta związane z tematyką rozprawy. Na szczególne podkreślenie zasługuje aktualność cytowanej w pracy literatury, co świadczy o dobrym rozeznaniu Autora w tematyce rozprawy. Ponadto szczególnie godna podkreślenia jest bardzo duża liczba rysunków ilustrująca graficzną stronę pracy i ułatwiająca dogłębne zapoznanie się z jej treścią.

### **4. Wniosek końcowy**

**Rozprawa doktorska “ Modelowanie i analiza ząbienia przekładni stożkowych w środowisku CAD” 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. *Bartłomieja Sobolewskiego* do publicznej obrony, a po jej pozytywnym przebiegu o nadanie stopnia doktora nauk technicznych.**

Warszawa, 18.03.2015r.

