

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartłomieja Sobolewskiego nt. "Modelowanie i analiza zazębienia przekładni stożkowych w środowisku CAD"

Recenzję wykonano na zlecenie Dziekana Rady Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, dr. hab. inż. Jarosława Sępa, prof. PRz (pismo RM-530-10-03-2015) oraz Prorektora ds. Nauki, prof. dr. hab. inż. Leonarda Ziemiańskiego (umowa o dzieło).

1. Charakterystyka pracy

Rozprawa liczy łącznie 120 stron formatu A4. Podzielona jest na sześć głównych rozdziałów uzupełnionych o wstęp, wykaz ważniejszych oznaczeń, spis literatury oraz streszczenie w języku polskim.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie w tematykę przekładni stożkowych. Zwraca uwagę na złożoność zagadnień konstrukcyjnych i technologicznych występujących w projektowaniu i wytwarzaniu tych przekładni. Podkreśla znaczenie i korzyści wynikające z metod analitycznych opracowanych na podstawie teorii zazębienia, służących ocenie i optymalizacji współpracy kół stożkowych oraz technologii ich wykonania. Wymienia komercyjne oprogramowanie komputerowe służące do analizy zazębienia przekładni stożkowych informując o zastrzeżeniach dotyczących jawności procedur obliczeniowych oferowanych aplikacji. Wprowadza tym samym w tematykę pracy podkreślając możliwości współczesnych narzędzi projektowych w postaci oprogramowania CAD. W rozdziale tym zawarto również informacje na temat metod obróbki i charakterystyczne cechy kół stożkowych według systemu Gleason i Klingelnberg-Oerlikon.

Rozdział drugi w całości poświęcony jest przeglądowi literatury. Problematyka pierwszej części rozdziału odnosi się do teorii dotyczącej matematycznego opisu geometrii zazębienia przekładni stożkowych. Przedstawia pozycje prezentujące podstawy teorii zazębienia bazujące na rachunku wektorowym i geometrii różniczkowej oraz wynikającą z tego analizę śladu styku zębów (TCA). Pokazuje również ograniczenia w zakresie jawności opracowanych modeli matematycznych z perspektywy istniejących systemów komputerowych wspomagających prace projektowe przekładni stożkowych. Druga część rozdziału podejmuje problematykę

wykorzystania środowiska CAD w projektowaniu uzębienia i analizie zazębienia kół przekładni stożkowych. Szczególną uwagę zwraca na metodę symulacji obróbki pozwalającą na odzwierciedlenie rzeczywistego procesu kształtowania uzębienia kół jak i możliwości dalszego wykorzystania uzyskanych tym sposobem modeli.

Rozdział trzeci wynika niejako z przedstawionych informacji w poprzednich rozdziałach i zawiera sprecyzowanie tezy, celu oraz zakresu pracy.

Rozdział czwarty stanowi zasadniczą część pracy. Obejmuje przygotowanie wirtualnych modeli CAD kół stożkowych. Omawia budowę obrabiarki do kształtowania kół stożkowych z ukierunkowaniem na jej geometrię oraz względne ustawienie narzędzia i przedmiotu obrabianego. Geometria ta została odzwierciedlona w środowisku CAD co w konsekwencji, wykorzystując metodę symulacji obróbki dla zadanego kroku odtaczania, pozwoliło na wygenerowanie modeli kół zębatach. Rozdział ten zawiera również bardzo istotną część a mianowicie badanie dokładności opracowanych modeli. Jako wzorzec odniesienia w tym zakresie przyjęto współrzędne punktów powierzchni bocznej zęba koła wyliczone na podstawie modelu matematycznego. Analizę dokładności modelu przeprowadzono w środowisku oprogramowania GOM Inspection. Badaniu poddano trzy modele wygenerowane w trzech systemach (AutoCAD, Inventor oraz Catia) różniące się przyjętym krokiem odtaczania. Dodatkowo na jednym modelu porównano zbiorczo odchyłki odnoszące się do wymienionych powyżej środowisk CAD. Końcówkę rozdziału stanowi analiza odnosząca się do określenia minimalnych wartości parametrów opisujących geometrię obiektów, co dowodzi, że geometria uzyskanych modeli jest w zakresie dokładności obliczeń systemów CAD.

Rozdział piąty to tematyka opracowania gładkich powierzchni bocznych zębów kół na podstawie bryłowych modeli CAD uzyskanych metodą symulacji obróbki. Przygotowanie gładkiej powierzchni obejmuje dwa etapy prac. Jeden odnosi się do przygotowania profili zarysu zęba a drugi do rozłożenia na nich powierzchni. Profil zarysu zębów tworzono na bazie punktów będących częścią wspólną powierzchni posiadanego modelu bryłowego koła oraz równomiernie rozłożonych powierzchni stożkowych. Profil rozłożono również na punktach środkowych odcinków prostych przybliżających zarys zęba koła w wybranym przekroju. Ocenę poprawności uzyskanych profili zarysu dokonywano na podstawie analizy krzywizn w środowisku CAD. Etap badań dotyczący oceny dopasowania gładkiej powierzchni do modelu bryłowego zęba zrealizowano poprzez różne warianty rozłożenia powierzchni na profilach przechodzących przez punkty obliczone z matematycznego modelu. Miernikiem jakości dopasowania powierzchni gładkiej do graniastej powierzchni modelu bryłowego były odchyłki pomiędzy powierzchniami określane w wybranych punktach.

Rozdział szósty to etap bazujący już na przygotowanych modelach kół. Obejmuje wyznaczenie przebiegu linii styku zębów jak i linii przyporu na podstawie autorskiej metody wykorzystującej element pośredni. Przedstawia również sposób wyznaczenia śladu współpracy zębów kół poprzez założone pogrubienie jednego z zębów odpowiadające odkształceniu materiału. Uzyskane wyniki porównano z

wynikami z komercyjnego oprogramowania, których zgodność potwierdziła poprawność przyjętego postępowania. W rozdziale tym przedstawiono również tworzenie wykresów ruchowych na podstawie modeli CAD kół.

Rozdział siódmy to podsumowanie i wnioski z przeprowadzonych badań. Pracę kończy spis literatury obejmujący 67 pozycji.

2. Ocena pracy

2.1. Aktualność i znaczenie podjętej tematyki

Projektowanie przekładni stożkowych to złożony proces charakteryzujący się ścisłą zależnością etapów konstrukcyjnego i technologicznego. Wynika to z konieczności wzajemnego geometrycznego dopasowania uzębienia współpracujących kół. Obecnie przygotowanie właściwej geometrii uzębienia wymaga przeprowadzenia szeregu złożonych obliczeń. Obliczenia te prowadzone są według zastrzeżonych procedur czołowych producentów dopasowanych do kinematyki produkowanych przez siebie obrabiarek. Ogranicza to samodzielność w projektowaniu i wytwarzaniu przekładni stożkowych, pomimo bardzo dużej ich powszechności, jak również dostępności obrabiarek pozwalających na ich fizyczne wykonanie. Ponadto, wymusza korzystanie z komercyjnego oprogramowania bazującego na zastrzeżonych procedurach, zwiększając koszt wykonania nowej przekładni. Tak więc, wszelkie prace związane z przygotowaniem zasad konstrukcji i technologii wykonania tych przekładni oraz analizą ich pracy są jak najbardziej wskazane. Jednym z takich kierunków jest wykorzystanie powszechnie dostępnych systemów CAD. Ich szczególną zaletą jest dostępność różnorodnych metod przygotowania modeli części jak również możliwości nieograniczonego względnego ustawienia zamodelowanych obiektów. Umożliwia to, w odniesieniu do kół zębatach, przeprowadzenie szeregu analiz kształtowania geometrii uzębienia odpowiadających kinematyce rzeczywistej obróbki oraz analiz współpracy modeli kół w postaci wykresów ruchowych czy geometrii styku zębów. Duża swoboda w zakresie zestawień modelowych części w CAD stwarza ponadto możliwości dalszego rozwoju konstrukcji i technologii tej grupy wyrobów. Umożliwia prowadzenie samodzielnych badań niezależnie od warunków określonych przez czołowych producentów. Może to przyczynić się do opracowania nowszych rozwiązań o lepszych parametrach eksploatacyjnych a zarazem łatwych w wykonaniu. Oczywiście w każdym przypadku należy zmierzyć się z problemem poprawnego odtworzenia rzeczywistej geometrii koła zębatego przez wirtualny model. Jest to gwarantem uzyskania wiarygodnych wyników prowadzonych prac w tym obszarze.

Tak więc, Doktorant podejmując się powyższej tematyki wybrał ważny i aktualny temat zarówno z poznawczego jak i praktycznego punktu widzenia.

2.2. Realizacja badań i uzyskane wyniki

Recenzowana praca obejmuje kompleksowe podejście wykorzystania oprogramowania CAD do zamodelowania oraz analizy zazębienia kół przekładni stożkowej. Badania w pierwszym etapie odnoszą się do wklęsłej strony zęba zębniaka kształtowanego metodą SGT (Spiral Generated Tilt). Bryłowe modele CAD uzyskano metodą symulacji obróbki, dla założonych kroków względnego odtaczania modeli otoczki i narzędzia, przyjmując ustawienia bazowe obrabiarki oraz geometrię narzędzia odpowiadające rzeczywistej obróbce. Podanie informacji jak obliczono ustawienia wstępne oraz ich schematyczne pokazanie łącznie z zestawieniem brył narzędzia i otoczki znacząco zilustrowałoby istotę kształtowania. Również należało trochę ujawnić w jaki sposób uzyskano współrzędne z modelu matematycznego. Traktowane są one jako wzorzec odniesienia, co jest poprawnym podejściem, ale pokazano tylko końcową postać jako chmurę punktów. Wartościową rzeczą w pracy jest ocena dokładności bryłowych modeli CAD wykonanych w różnych systemach w stosunku do przyjętego wzorca. Daje to informację na temat wielkości odchyłek gładkości powierzchni w zależności od przyjętego kroku odtaczania oraz ich niezależności od zastosowanego systemu CAD. Należy jednakże zauważyć, że nie są to maksymalne wartości odchyłek. Kolejny istotny element pracy to badania nad uzyskaniem gładkiej powierzchni boku zęba obejmujący przygotowanie profili zarysu oraz sposób zdefiniowania powierzchni gładkiej. Przeprowadzone badania pokazały, że bazując na modelu o powierzchni gładkiej, wychwycenie punktów zarysu zęba jako punktów przebicia tej powierzchni zęba przez równomiernie rozłożone powierzchnie stożkowe nie przynosi zadowalających efektów. Jest mało prawdopodobne aby równomierny rozkład stożkowych powierzchni cięcia trafił w środki odcinków prostych przybliżających krzywoliniowy zarys zęba, tym samym eliminując odchyłkę gładkości. Przedstawiony sposób może być użyteczny tylko przy bardzo małym kroku odtaczania, z czym związana jest minimalna wartość wymienionej odchyłki. Kierunkiem dalszych badań w tym zakresie może więc być ustalenie maksymalnego kąta odtaczania, czy też minimalnej liczby punktów na zarysie zęba zapewniających wiarygodne odtworzenie geometrii uzębienia w modelu CAD. Generowanie gładkiej powierzchni obejmowało różne warianty jej definicji na profilach przechodzących przez obliczone współrzędne z modelu matematycznego. Kryterium oceny uzyskanej powierzchni był rozkład jej odchyłek od powierzchni gładkiej. Istotnym wynikiem przeprowadzonych badań było wskazanie różnic w jakości powierzchni wynikających ze sposobu ich definicji oraz specyfiki systemu CAD. Przeprowadzenie analizy krzywizn powierzchni pozwoliłoby na jeszcze lepszą ocenę ich jakości dzięki wyeliminowaniu wpływu gładkości powierzchni względem której określano rozkład odchyłek. Na podstawie przeprowadzonych badań można wytypować najlepszy sposób definicji gładkiej powierzchni boku zęba w analizowanych systemach CAD, co można potraktować jako wytyczną w dalszych pracach projektowych. Szkoda, że tego nie podano w pracy. Oryginalnym osiągnięciem Autora pracy jest sposób wyznaczenia linii styku i linii przyporu z wykorzystaniem elementu pośredniczącego. Również sposób wyznaczenia śladu

styku na podstawie pogrubienia powierzchni bocznej zęba, pozwala na efektywne przeprowadzenie analiz. Poprawność założeń oraz zrealizowanych badań potwierdza zgodność uzyskanych wyników z wynikami z komercyjnego oprogramowania.

Zaprezentowany sposób postępowania podczas badań należy uznać za właściwy. Zarówno przedstawienie podejmowanych zagadnień jak i propozycje rozwiązań problemów świadczą o umiejętności właściwego spojrzenia przez Doktoranta na przedmiot badań. Dodatkowo, umiejętności praktyczne w zakresie odpowiedniego wykorzystania systemów CAD świadczą o zdolności i predyspozycjach do prowadzenia prac naukowych.

2.3. Strona redakcyjna i edytorska pracy

Bazując na przedstawionej charakterystyce pracy można stwierdzić, że występują w niej typowe elementy prac naukowych. Zawiera wprowadzenie w istotę problemu, pokazanie aktualnego stanu badań z danego obszaru, określenie celu i tezy pracy oraz propozycję rozwiązania podejmowanych problemów poparte szeregiem badań. Przyjęty układ pracy można uznać za właściwy.

Praca bazuje na 67 pozycjach literatury. Są to pozycje współczesne jak i pozycje publikowane w latach wcześniejszych. W spisie literatury występuje jednak kilka pozycji na które nie ma powołania tekście. Być może przygotowane nawiasy na stronie 111 oczekują na te pozycje.

Uważam, że nie było potrzeby prezentowania w pracy podstaw teoretycznych krzywych i powierzchni (rozdział 5.1), gdyż w prowadzonych pracach w zakresie modelowania w środowisku CAD nie modyfikowano typu obiektów geometrycznych. W to miejsce można było omówić sposoby modelowania krzywych i powierzchni oraz możliwości ich analizy dostępne w wykorzystywanych systemach.

W podrozdziałach 4.4 oraz 4.5 dotyczących oceny dokładności modeli bryłowych CAD występuje powtórzenie rysunków. Można to było zrealizować w ramach jednego podrozdziału.

Praca napisana jest językiem zrozumiałym. Występuje jednak szereg błędów edytorskich a niektóre korekty edytora tekstu sugerują tematykę pracy z innej dziedziny naukowej. Uwagi można mieć również do czytelności rysunków. Sposób ich prezentacji w wielu wypadkach uniemożliwia odczyt wyników przeprowadzonych analiz. Ponadto w niektórych miejscach występują pewne niedociągnięcia. Przykładowo:

- na str. 15 w wyliczeniu dotyczącym sposobów uzyskania zbieżności stożków kół występuje ten sam opis dla odmiennych metod a na str. 16 również w wyliczeniu występuje opis tej samej metody w dwu miejscach,
- błędny jest opis rysunku 4.1,
- rys.4.4 - to samo oznaczenie dwu układów współrzędnych,
- na str. 31 jest informacja, że symulację obróbki kół przeprowadzono w oparciu o dane zamieszczone w tabeli, podczas gdy w tabeli są parametry tylko dla jednego koła. O parametrach drugiego koła, które pojawia się w dalszej części pracy brak jakichkolwiek informacji,

- tab.4.1 - otoczka to półfabrykat a nie koło zębate,
- str. 32 stwierdzenie: "Przyjęty tok postępowania był analogiczny w każdym z analizowanych systemów CAD" - we wcześniejszym tekście brak informacji o jakie systemy chodzi,
- rys. 4.13 - brak tytułu rysunku,
- dwuznaczny tytuł rozdziału 4.4,
- na str. 70 jest stwierdzenie „Ze względu na zaobserwowaną bezpośrednią zależność sposobu generowania na dokładność odwzorowania geometrii powierzchni powstałej w wyniku symulacji obróbki przez profile wymienione etapy prowadzono równolegle.” Nie wiadomo o co chodzi,
- na str. 80 powinien być numer rysunku 5.31 a nie 5.26,
- w rozdziale 5.2.2 dotyczącym generowania powierzchni niektóre podpisy pod rysunkami nie informują z jakiego systemu jest dany model.

Inne uwagi przekazano bezpośrednio Autorowi pracy.

3. Uwagi i pytania do pracy

Mimo niewątpliwych zalet, w pracy pojawiają się pewne niedomówienia, niejasności, które nasuwają pytania i na które chcę zwrócić uwagę:

- Jak uzyskano wyniki przedstawione w tabeli 4.1-parametry wejściowe, na których oparto model koła będący przedmiotem badań?
- Jak obliczono współrzędne punktów odniesienia według modelu matematycznego?
- Czym kierowano się przyjmując w badaniach krok dyskretyzacji, oraz na podstawie przeprowadzonych badań jakie są zalecenia dotyczące wartości tego kroku aby uzyskać poprawny model CAD?
- Czy odczytano wartość maksymalnej odchyłki graniastości modelu gdyż na podstawie przeprowadzonej analizy odległości powierzchni modelu boku zęba od współrzędnych z modelu matematycznego równomiernie rozłożonych na powierzchni zęba nie ma pewności, że wychwycono najwyższy i najniższy punkt zarysu?
- Jaki sposób rozłożenia powierzchni gładkiej jest najlepszy i w którym systemie uzyskuje się najlepszy efekt?
- Jak zamodelowano współpracujące koło stożkowe wykorzystywane w analizach styku zębów?
- Ocenę jakości wygładzenia powierzchni oparto o pomiar jej odległości od powierzchni graniastej i stwierdzono, że dokładność odwzorowania jest poniżej 0,2µm (str.102). Czy w tej ocenie uwzględniono wysokość graniastości?
- Jaką wielkość pogrubienia zęba przyjmować w analizach śladu styku?

Przedstawione powyżej uwagi nie umniejszają pozytywnej oceny pracy.

4. Podsumowanie i wniosek końcowy

Podsumowując, można stwierdzić, że rozprawa doktorska mgr inż. Bartłomieja Sobolewskiego podejmuje ważny temat zarówno z poznawczego i praktycznego punktu widzenia. Doktorant wykazał się wiedzą i umiejętnościami praktycznymi z zakresu wykorzystania środowiska CAD w modelowaniu i analizie ząbienia przekładni stożkowych. Świadczy to o jego zdolności do prowadzenia prac naukowych. Przedstawione w recenzji uwagi mogą stanowić zbiór wskazówek w dalszej pracy naukowej.

**Stwierdzam, że rozprawa spełnia wymogi o stopniach i tytule naukowym.
Wnioskuje o dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

Stożkowy