

Wrocław, dnia 30.06.2016 r.

Dr hab. inż. Radosław Zimroz, Prof. PWR
Politechnika Wroclawska
Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii
Na Grobli 15, 50-421 Wrocław
Dyscypliny naukowe
elektronika, górnictwo i geologia inżynierska
specjalności
diagnostyka maszyn, elektronika, maszyny górnicze,
przetwarzanie i analiza sygnałów, systemy informatyczne

RECENZJA

rozprawy doktorskiej pt.

Prognozowanie stanu dynamicznego przekładni zębatej stożkowej
z uwzględnieniem obciążenia maszyn górniczych

Autor: mgr inż. Krzysztof Twardoch

Promotor: Prof. dr hab. inż. Antoni Skoć

Podstawa formalna

Niniejsza Recenzja opracowana została na podstawie decyzji Rady Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej i w konsekwencji pisma skierowanego przez Pana Dziekana Wydziału Górnictwa i Geologii, Prof. dra hab. inż. Mariana Dolipskiego z dnia 02.06.2016 r.

Ocena ogólna rozprawy. *Znaczenie tematyki*

Współcześnie trudno sobie wyobrazić działalność górnictwą bez wspomagania eksploatacji złożonymi systemami maszynowymi. Urabianie, transport, przeróbka itd. to podstawowe procesy, w których niezawodne działanie systemów maszynowych jest fundamentem bezpiecznej i efektywnej produkcji górniczej. W każdym z wymienionych przypadków występują układy napędowe i chyba można zaryzykować twierdzenie, że w każdym występują wielostopniowe przekładnie zębate ze stopniem stożkowym.

Analizy przedstawiane w pracach różnych Autorów (nie wyłączając Doktoranta czy Recenzenta) pokazują wyraźnie, że stopień stożkowy jest jednym z elementów układu napędowego, który najczęściej ulega awarii, zatem znaczenie poprawnego projektowania, wykonania i eksploatacji stopnia stożkowego jest z punktu widzenia eksploatacji systemów maszynowych w górnictwie bardzo ważne. Ze względu na moce, gabaryty, koszty stanowisk badawczych i koszty przeprowadzania eksperymentów wykorzystanie zaawansowanego modelowania do symulacji zachowań dynamicznych przekładni jest całkowicie uzasadnione. W ostatnich latach można odnotować w literaturze wzrastające zainteresowanie dynamiką przekładni planetarnych, niestety, stopnie stożkowe ciągle pozostają w „niełasce” badaczy, w mojej ocenie głównie ze względu na znaczny stopień złożoności problematyki. Recenzent z zadowoleniem przyjmuje i z uznaniem ocenia podjęcie tematyki rozprawy przez Doktoranta.

Podsumowując, tematyka pracy jest istotna (z punktu widzenia eksploatacji górniczej, ale także dla wielu innych aplikacji, gdzie stosuje się przekładnie zębate), podjęcie badań w tym zakresie uważam za zasadne zarówno z teoretycznego, jak i z aplikacyjnego punktu widzenia.

Jednoznacznie stwierdzam, że praca mieści się w dyscyplinie „górnictwo i geologia inżynierska”.

Struktura. Analiza zawartości poszczególnych rozdziałów

Struktura pracy jest poprawna, odpowiada wymogom stawianym rozprawie doktorskiej. Autor w rozdziale 1 stopniowo wprowadza Czytelnika w problematykę wskazując kluczowe zagadnienia, które opisywane są ze szczegółami w kolejnych rozdziałach.

Rozdział 2 zawiera uzasadnienie podjęcia tematu (wpływ obciążeń, stopień stożkowy w rozwiązaniach konstrukcyjnych układów napędowych maszyn górniczych, awaryjność przekładni) i jednocześnie stanowi przegląd literatury związanej z rozprawą (rozdział 2.2).

W Rozdziale 3 przedstawiono cel, tezę i szczegółowy zakres pracy.

W Rozdziale 4 Autor ponownie, ale już nieco szerzej, analizuje stan wiedzy w zakresie dynamiki przekładni zębatych, rozważając problematykę modelowania bardzo szeroko, włączając do rozważań także analizę różnych technik modelowania.

W Rozdziale 5 Autor prezentuje model fizyczny i matematyczny układu „stopień stożkowy”, a w Rozdziale 6 proponuje szczegółowy opis elementów modelu, w szczególności sztywności zazębienia i tłumienia. Do wyznaczania sztywności Autor proponuje wykorzystanie technik modelowania w środowisku CAD.

Niejako „przy okazji” przedstawia wyniki analizy śladu współpracy pary kół stopnia stożkowego.

Rozdział 7, zgodnie z tytułem, dotyczy metodyki badań wpływu obciążenia zewnętrznego na stan dynamiczny przekładni zębatej stożkowej, w istocie zawiera szczegółowe informacje dotyczące metod numerycznych i autorskiego środowiska symulacyjnego opracowanego w Matlabie.

W Rozdziale 8 Autor przedstawia wyniki badań dotyczących weryfikacji opracowanego modelu i odnosi wyniki symulacji do badań stanowiskowych wykorzystując jako kryterium zgodności zachowanie współczynnika dynamicznego.

W Rozdziale 9 znajduje się kluczowa część pracy. Autor przedstawia w tym rozdziale wyniki badań symulacyjnych dla wybranych przebiegów obciążeń zarejestrowanych w czasie pracy przenośnika zgrzeblowego.

Wyniki te prezentowane są na różne sposoby np.: w postaci przebiegów czasowych (zmienność siły międzyzębnej w czasie), zmienności współczynnika dynamicznego K_v dla różnych prędkości, jako portrety fazowe, mapy sił międzyzębnych, histogramy obciążeń itd.

Rozdział ten stanowi oryginalny wkład w rozwój wiedzy o dynamice przekładni stożkowej z uwzględnieniem obciążenia zewnętrznego.

Rozdział 10 zawiera podsumowanie i wnioski. Autor bardzo rzeczowo przedstawia wyniki osiągnięte w rozprawie.

Praca kończy się rozdziałem 11 „Słowem koniec”, w której Autor z nutą filozoficznej refleksji próbuje spozycjonować siebie i uzyskane wyniki w przestrzeni badawczej obejmującej problematykę dynamiki przekładni zębatych.

Godny podkreślenia jest zbiór cytowanych prac, obejmujący aż 303 pozycji, w większości są to wiodące czasopisma zagraniczne i „kultowe” prace w rozważanym obszarze naukowym.

W pracy znajduje się wiele czytelnych diagramów, schematów, algorytmów itd., które uzupełnione opisem stają się ciekawą i przystępną formą rozważań naukowych.

W podsumowaniu można stwierdzić, że **struktura pracy jest poprawna**, cele i teza są jasno określone, w rozprawie z łatwością odnajduje się oryginalne osiągnięcia Autora.

2

Ocena merytoryczna pracy, uwagi ogólne i szczegółowe uwagi krytyczne

Ogólna ocena pracy jest pozytywna. W czasie studiowania rozprawy i przygotowywania recenzji sformułowano kilka uwag natury ogólnej oraz szczegółowe uwagi krytyczne przedstawione poniżej.

Uwaga ogólna 1

Można odnieść wrażenie, że Doktorant uważa obciążenia wewnętrzne i zewnętrzne za niezależne. Czy możliwe jest zdaniem Doktoranta oddziaływanie obciążenia zewnętrznego na wielkość obciążeń wewnętrznych?

We wcześniejszych pracach Bartelmusa wykazano prostymi technikami, że wartości energii „sygnału zazębienia” w pewnych zakresach obciążeń liniowo zależą od wartości obciążenia zewnętrznego, w ogólności zależność jest nieliniowa, co więcej zależność ta zmienia się wraz ze zmianą stanu technicznego. Innymi słowy, zmiany wartości obciążenia powodują zmiany warunków zazębienia, co dodatkowo wzmacnia dynamikę pary kinematycznej.

Czy takie zjawisko zostało odnotowane przez Autora?

Uwaga ogólna 2

Model przedstawiony na rys.5.1 jest modelem jednostopniowej przekładni zębatej. Czy takie właśnie przekładnie są stosowane w układach napędowych maszyn górniczych? Dlaczego Autor nie uwzględnił także przynajmniej jednego stopnia walcowego? Czy w modelu uwzględnione zostały: silnik (jaka charakterystyka?) oraz sprzęgło?

Uwaga ogólna 3

Nie do końca jest dla mnie jasne jaki jest krok próbkowania w modelu. Z rys 7.10 wnioskuję że może to być 10^{-4} ? – moim zdaniem to trochę mało, w badaniach które były prowadzone przez ośrodek wrocławski skutkowało to aliasingiem. W dziedzinie czasu tego efektu można nie odnotować.

Uwaga ogólna 4

Autor wykazuje się dużą wiedzą w zakresie wykorzystania CAD. Jak sam pisze na stronie 106 – wykonał „rozeznanie sytuacji w środowisku komputerowych systemów CAD/CAM/CAE”. Dyskusja na temat wyboru elementów w modelu MES jest dla mnie bardzo interesująca. Osobiście uważam wiedzę Doktoranta za godną podkreślenia w recenzji.

Uwaga ogólna 5

Zaprezentowana analiza śladu współpracy zębów koła i zębniaka jest z mojej perspektywy niezwykle interesująca i stwarza nowe możliwości badawcze.

Uwaga ogólna 6

Model zaprezentowany na TEMAG2013 i jak autor pisze przyjęty z uznaniem. To świadczy o pozycji Autora w środowisku.

Uwaga krytyczna ogólna

Praca stanowi ciekawy materiał naukowy i warta jest publikacji. Niestety, przed opublikowaniem praca powinna zostać przeredagowana. Jest zbyt obszerna i w mojej ocenie nie najlepiej ustrukturyzowana. Zawiera zbyt wiele niepotrzebnych wtrąceń i dygresji, język pracy przypomina raczej rozprawę filozoficzną niż rozprawę doktorską w dziedzinie nauk technicznych. Proces tworzenia modelu 3D powinien znaleźć się w załączniku.

Uwaga krytyczna ogólna

Rozdział 7.3 – do załącznika, to jest opis programu, instrukcja obsługi, nie zawiera wartości naukowych.

Uwagi szczegółowe

Str.50.

„...niską emisją akustyczną...”

hałasem?

Str.63.

„Wzbudzenia pochodzące od źródeł wewnętrznych cechuje na ogół znacznie wyższa częstotliwość niż wzbudzenia ze źródeł zewnętrznych. Stąd większy wpływ na obciążenie dynamiczne przekładni przypisuje się źródłom wewnętrznym, bowiem prawdopodobieństwo pracy przekładni w paśmie częstotliwości rezonansowych jest znacznie większe.”

To zdania dość kontrowersyjne...

Jeśli rozważymy obciążenia zewnętrzne jako procesy deterministyczne - brak obciążenia i silnie obciążona przekładnia charakteryzują się zupełnie inną dynamiką. Dla obciążenia o charakterze losowym, czy jeszcze gorzej, transjentowym – odpowiedź dynamiczna przekładni silnie będzie zależeć od czynnika obciążenia zewnętrznego.

To ciekawy temat na bardzo naukową dyskusję!

Str.73.

„Hałas jest generowany w wyniku uderzania zęba o ząb, który występuje w momencie, gdy zęby obu kół współpracujących ponownie wchodzi w przypór, stykając się ze sobą bokami. Chwilowe utraty kontaktu pomiędzy zazębionymi zębami występują często w specyficznych warunkach pracy układu przekładniowego. Przykład mogą być warunki pracy przy nadmiernych wibracjach’

Opis jak się generuje hałas wymaga jednak małej korekty.... Co jest przyczyną a co skutkiem?

Str.96.

„Przedstawiona charakterystyka jest przykładem analizy widmowej, czyli rozkładu widma drgań na poszczególne składowe harmoniczne zazębienia.”

Rozkładu widma drgań? Co Autor miał na myśli?

Str.98.

Żargon („splinem”) nie powinien być stosowany w oficjalnej rozprawie.

Str.151.

Rys.6.48. „Mapa dynamiczna sztywności skrętnej zazębienia”

Jak interpretować te mapy? Jak Autor zaimplementował te nie-funkcyjne zależności w modelu?

Str.157. Rozdział 7.

Wprowadzenie do rozdziału 7 jest jedną wielką dygresją, a może nawet akapitem nie na temat.

Tak samo jest w rozdziale 9.

Str.177.

Rys. 8.1, 8.2 – co przedstawia ten przebieg? To wygląda jak zapis drgań oscylatora z tłumieniem (tłumiona wykładniczo sinusoida). Wiadomo, że postać drgań pary zębów jest sygnałem harmonicznym (podstawowa częstotliwość zazębienia i harmoniczne). Proszę o komentarz.

Str.178. Rys.8.3.

Jakiś komentarz dotyczący postaci sygnału? (góra „pływa”, dół „stoi”, niestabilności na początku, wpływ obciążenia? Jak to się ma do poprzednich rysunków?)

Str.187. Rys.8.8.

Błędy formalne w budowaniu algorytmu (krzyżują się linie, źle zdefiniowany warunek, zmodyfikowane kształty, start stop)

Str.190, rys.9.1 oraz str.11, rys.2.2.

Charakter zmian prądu oraz mocy jest trochę inny niż te prezentowane z rys. 9.2-9.4.

Można to jakoś wyjaśnić?

Str.194. Rys.9.2.

Czy procesy z rys.9.2-9.4 są losowe? W mojej ocenie charakter zmian jest raczej deterministyczny. Czy nie powinno się przeprowadzić modelowania zmienności obciążeń?

Str.198.

Nie jest dla mnie jasne jak to możliwe, że obciążenie się zmienia, a zakładamy stałą prędkość nominalną...

Podobnie, wyjaśnienia wymaga dlaczego zmienności wskazanej w przebiegach obciążenia nie widać na rys.9.5-9.6. Co oznacza ta brązowa linia? Stałe obciążenie? W mojej ocenie brakuje głębokiej analizy uzyskanych szeregów czasowych.

Str.203.

Dygresja nt. definicji układu dynamicznego na str. 203? W pracy o modelowaniu dynamiki? W mojej ocenie trzeba było od tego zacząć we wprowadzeniu...

Str.205.

Rys.9.10 (i kolejne na kolejnych stronach...)

Jaka jest praktyczna interpretacja takich wykresów? Jakie konkluzje Autor wysnuł na podstawie takich wykresów?

Str.212.

„Zbiór liczbowy wartości maksymalnej siły międzyzębnej posłużył do utworzenia histogramów obciążeń zębów (w przyporze), a w oparciu o nie histogramu skumulowanego obciążenia zazębienia (wynikającego ze wskaźnika przyporu) [43, 100, 135]. Stworzono także histogram zmiennego obciążenia zewnętrznego.”

Przykłady tworzenia histogramów metodami numerycznymi zostały przedstawione na rysunkach 9.14 oraz 9.15. Przebiegi są deterministyczne. Histogram (funkcja gęstości prawdopodobieństwa) stosuje się do procesów losowych. W mojej ocenie tutaj trzeba było zbudować model szeregu z uwzględnieniem czasu, a nie rozkładu wartości. Rozkład „gubi czas”, stany nieustalone w maszynach górniczych to nie tylko wartość, ale i charakter zmienności.

Str.223.

Przyjęte parametry symulacji wymagają wyjaśnienia.

$dt=10^{-4}$ to wg mnie wartość zbyt niska. Dlaczego Autor zastosował skok 20rpm? Jaka jest charakterystyka silnika?

Układ dynamiczny jako filtr dolnoprzepustowy? Nie zgadzam się z interpretacją Autora.

Analiza dynamiki bez analizy Fouriera jest uproszczeniem. Czy jest jakiś konkretny powód dlaczego Autor nie wykorzystał analizy widmowej (do oceny widma obciążeń, do oceny widma odpowiedzi)

„W strefie tych prędkości obrotowych, w związku z nieliniowym charakterem obciążenia wewnętrznego pojawia się problematyka interharmonicznych, czyli składowe drgań o częstotliwości większej niż harmoniczna podstawowa i niebędące jej całkowitą wielokrotnością. Źródłem ich generowania w zazębieniu mogą być powtarzające się, parametryczne zmiany obciążenia, wynikające z asymetrycznej charakterystyki sztywności skrętnej zazębienia (c-). Konsekwencją występowania interharmonicznych w układzie mogą być zdudnienia z częstotliwością podstawową i harmonicznymi powodującymi wahania obciążenia. Interharmoniczne mogą pojawiać się jako częstotliwości dyskretne powodujące wzbudzenia chaotyczne układu (rys. 9.12); mogą zakłócać poprawną pracę przekładni i zmniejszać jej sprawność.”

W mojej ocenie na 223 stronie autor zawarł 2 stwierdzenia, które wymagają uzasadnienia widmowego. Wnioskowanie o pojawianiu się dodatkowych składowych na podstawie analizy przebiegu sygnału jest dość trudne.

Str.224. Rys.9.19.

Przedstawiony rysunek wymaga głębokiego komentarza. Zachowania rezonansów są różne, dlaczego?

Str.226.

Po co Autor robi analizy dla prędkości nadkrytycznych skoro tego w ogóle nie ma w maszynach górniczych? Jeśli ciekawość autora jest na tyle silna (popieram!), proszę przenieść te rozważania jako suplement do załącznika w pracy.

Str.233. Rys.925.

Jak interpretować te mapy?

Str.236.

Czy dla przypadku przekładni obciążonej dochodzi do odrywania się zębów?

Str.241.

Proces weryfikacji walidacji?

Walidacji i weryfikacji?

Str.242.

Dlaczego Autor stosuje interpolacje histogramów a nie po prostu estymuje gęstość?

Str.243.

„Okazuje się, że wzrostowi obciążenia towarzyszy zmiana modalność rozkładu normalnego cykli ... w rosnąco uporządkowanej dziedzinie obciążenia – z 2-modalnego w przypadku $M_o=100\text{ Nm}$ rozkład ewoluuje do 3-modalnego dla $M_o=500\text{ Nm}$. Oznacza to, że statystycznie tworzy się dodatkowa grupa cykli o znacznej przewadze w całości rozkładu normalnego, która wpływa na obciążenia uzębienia i w konsekwencji na jego zasób trwałości zmęczeniowej.”

...

„Tak się jednak nie dzieje w przypadku przebiegu 6 zmiennego momentu. W przypadku $M_o=100\text{ Nm}$...”

To bardzo odważne wnioski. Moim zdaniem można to podważyć

Str.244.

Co to jest zjawisko synchronizacji drgań (ramki)?

Co to jest unoszenie drgań? Nadharmoniczne i podharmoniczne?

Str.245.

Rysunki od 9.30 – wymagają głębokiej, krytycznej dyskusji, także dotyczącej estymacji gęstości na podstawie histogramów z szeregów deterministycznych.

W mojej ocenie zależność pomiędzy obciążeniem i siłami międzyzębnymi jest liniowa.

Strona edytorska

- Jakość rysunków, czytelność opisów na rysunkach, stopień złożoności (kilka przebiegów na jednym rysunku).
- Autor stosuje w pracy pewne określenia, które funkcjonują w obiegu codziennym, ale uznać je należy raczej jako żargon, np.: „splajny” (od angielskiego splines).

Inne uwagi szczegółowe

Inne uwagi szczegółowe, w liczbie nieprzekraczającej kilku pozycji, zostały przekazane Autorowi rozprawy. Dotyczyły one głównie drobnych potknięć językowych czy tzw. „literówek” itd. Po przedyskutowaniu i wyjaśnieniu wątpliwości Autor zadeklarował, że zostaną uwzględnione na etapie ostatecznej redakcji tekstu.

Wymienione sugestie i drobne usterki nie obniżają wysokiej wartości recenzowanej rozprawy i ich uwzględnienie w ostatecznej redakcji tekstu nie stanowi problemu.

Wniosek końcowy

Podsumowując, stwierdzam, że przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska mgra inż. Krzysztofa Twardocha pt. „Prognozowanie stanu dynamicznego przekładni zębatej stożkowej z uwzględnieniem obciążenia maszyn górniczych” stanowi oryginalną pracę mieszczącą się w dyscyplinie „**górnictwo i geologia inżynierska**” i odpowiada warunkom określonym w Ustawie (*art. 13 ustęp 1 ustawy z dnia 14 marca 2003 r o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach w zakresie sztuki*), gdyż:

- stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego jakim jest analiza dynamiki przekładni zębatych (a ściślej kluczowego stopnia stożkowego w tychże przekładniach) ze szczególnym uwzględnieniem jej roli w układach napędowych maszyn górniczych;
- przedstawia nowatorski sposób identyfikacji sztywności zazębienia dla stopnia stożkowego;
- zawiera kompletny opis propozycji metodyki prognozowania stanu dynamicznego opartego na modelu (model fizyczny, matematyczny, implementacja komputerowa);
- zawiera oryginalną propozycję synergicznej analizy zmiennych w czasie obciążeń wewnętrznych i zewnętrznych – zmienność obciążenia w maszynach górniczych ogrywa kluczową rolę;
- wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie naukowej **górnictwo i geologia inżynierska w specjalności maszyny i urządzenia górnicze i wiertnicze**;
- wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

W mojej opinii rozprawa doktorska Pana mgra inż. Krzysztofa Twardocha spełnia ustawowe wymogi dotyczące rozpraw doktorskich w zakresie nauk technicznych i wnoszę do Wysokiej Rady Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Dodatkowo, uważam, że zrealizowany zakres pracy, jej objętość, stopień zaawansowania badań zaprezentowanych w rozprawie jest ponadprzeciętny. Język, styl wypowiedzi stosowany przez Autora (mimo, że w uwagach szczegółowych został przeze mnie nieco skrytykowany), filozoficzne widzenie badań naukowych, głębokie zrozumienie problematyki, świadomość i dojrzałość Autora, kompletność rozwiązania problemu, wykorzystanie nowoczesnych metod komputerowych zasługują na wyróżnienie.

Mając na uwadze wartość naukową rozprawy i znaczenie wyników badań w praktyce mechaniczno-górnictwa wnioskuję do Wysokiej Rady zatem o **wyróżnienie rozprawy** Pana mgra inż. Krzysztofa Twardocha.



Radosław Zimroz