

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej **mgra inż. Krzysztofa Towarnickiego**

pt.:

„Metoda projektowania tłumika spiralnego typu odgałęźnego do redukcji pulsacji ciśnienia w układach hydraulicznych”

Podstawą formalną opracowania recenzji jest pismo W10/RDND07/42/2024 z dnia 26.04.2024 r. Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej prof. dr hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego.

Praca doktorska mgra inż. Krzysztofa Towarnickiego poświęcona jest aktualnej i ważnej tematyce dotyczącej redukcji pulsacji ciśnienia w wybranych układach hydraulicznych.

Rozkwit hydrauliki nastąpił na przełomie XIX i XX wieku, kiedy urządzenia hydrauliczne zaczęto montować w samochodach. Szczytowym punktem rozwoju tych urządzeń był okres II wojny światowej oraz zapotrzebowanie na wydajne systemy obrotu, unoszenia i pozycjonowania bardzo ciężkich elementów, takich jak wieże artyleryjskich okrętów i czołgów oraz obsługi podwozi samolotowych. Dziś urządzeń hydraulicznych używa się niemal wszędzie, między innymi w przemyśle motoryzacyjnym, budowlanym, rolniczym, medycznym, spożywczym czy urządzeniach przemysłowych. Drgania mechaniczne, które występują w układach hydraulicznych są spowodowane pulsacją ciśnienia i są głównym źródłem hałasu. Dąży się do zmniejszenia lub wyeliminowania hałasu w układach hydraulicznych poprzez obniżenie amplitudy pulsacji ciśnienia stosując między innymi tłumiki jako filtry akustyczne i inne. Zjawisko pulsacji ciśnienia w układach hydraulicznych jest skutkiem występowania okresowo zmiennego natężenia przepływu cieczy w tych układach. Powodem tego jest kinematyka pracy elementów wporowych pomp oraz działania zewnętrznych wymuszeń w postaci drgań mechanicznych przenoszonych na elementy układu hydraulicznego.

Rozprawa doktorska o objętości 172 stron maszynopisu ma charakter eksperymentalny, napisana została w języku polskim i powiązana jest z dyscypliną naukową inżynieria mechaniczna. Rozprawa złożona jest z 7 rozdziałów, takich jak streszczenia w języku polskim i angielskim, wykaz ważniejszych oznaczeń, podsumowanie i wnioski końcowe oraz spis literatury zawierający 287 pozycji, w której to literaturze jest wymienionych 67 pozycji autorskich i współautorskich Doktoranta. W tym artykuły, udział w konferencjach naukowych i 2 patenty oraz 10 zgłoszeń patentowych.

1. Zakres rozprawy

Rozprawa doktorska rozpoczyna się od ważniejszych oznaczeń, następnie prezentowany jest wstęp. Wstęp to również 1szy rozdział wprowadzający w problematykę dotyczącą pracy. W rozdziale tym sformułowano problem i wyjaśniono po co użyto spiralnego tłumika typu odgałęźnego. W 1szym rozdziale przedstawiono również aktualny

stan badań oraz podano tezę, cel i zakres pracy, który obejmuje zbudowanie modelu matematycznego impedancji tłumika odgałęźnego o kształcie spiralnym, badania eksperymentalne skuteczności redukcji amplitudy pulsacji ciśnienia dla wybranej częstotliwości wymuszenia z wykorzystaniem zaprojektowanego tłumika oraz weryfikacja modelu matematycznego. Rozdział 2 dotyczy napędów hydraulicznych, i kontynuowane jest w nim omawianie podstawowych informacji z zakresu problematyki rozprawy dotyczących mikroukładów hydraulicznych, cieczy roboczych, stosowanych przepływów, strat ciśnienia czy pomp i zaworów hydraulicznych na bazie przeglądu literatury. Prezentując wiedzę teoretyczną Autor posiłkuje się literaturą również w rozdziałach 3 i 4. Rozdział 3 związany jest z pulsacją wydajności i ciśnienia w układach hydraulicznych, w tym przyczyn nierównomierności wydajności pomp wporowych, źródeł drgań mechanicznych działających na zawory hydrauliczne czy pulsacji ciśnienia powstającej na skutek działania zewnętrznych drgań mechanicznych, wywołana drganiami elementu sterującego i powstające podczas stanów przejściowych. W rozdziale 4 opisano redukcję pulsacji ciśnienia w układach hydraulicznych wynikającą z kinematyki pracy pompy wporowej, w wyniku oddziaływania zewnętrznych drgań mechanicznych na zawór hydrauliczny czy podczas stanów przejściowych. Pulsację ciśnienia czy tłumienia uderzeń w układach hydraulicznych można uzyskać poprzez zastosowanie akumulatorów hydraulicznych, tłumików biernych lub tłumików aktywnych oraz zaworów. Rozdział 5 dotyczy metody projektowania odgałęźnego, spiralnego tłumika pulsacji ciśnienia, w którym to rozdziale przedstawiono modele, obliczenia i wykresy. Rozdział 6 prezentuje badania doświadczalne dotyczące weryfikacji pulsacji ciśnienia z zastosowaniem biernego spiralnego tłumika typu odgałęźnego. Zaprezentowano stanowisko do badań, rezultaty wyników badań oraz porównano badania doświadczalne z symulacjami. Otrzymane wyniki prezentowane są w pracy w postaci wykresów, tabel i obliczeń. Rozdział 7 to podsumowanie i wnioski końcowe jak również zaproponowano kierunki dalszych badań. Bogata biografia zamyka rozprawę.

Objętościowo większa część pracy przedstawia własny wkład Doktoranta wzbogacając aktualny stan wiedzy o nowe wyniki eksperymentalne, obliczeniowe i analizy w tym zakresie, które w reprezentowanej dyscyplinie naukowej należy traktować jako cenne. Duża liczba przywołanych pozycji literaturowych wskazuje na dobre rozeznanie Doktoranta o stanie wiedzy dotyczącej podejmowanej w pracy tematyki.

Na podkreślenie zasługuje zakres badań eksperymentalnych i pomiarów, jaki został zrealizowany i ich opis oraz patenty i zgłoszenia patentowe. Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego zaplanowania badań i ich realizacji. Wyniki badań zostały opracowane właściwie i przedstawione w sposób czytelny i zrozumiały.

Mgr inż. Krzysztof Towarnicki w swoim dorobku naukowym posiada współautorstwo 8 artykułów opublikowanych w czasopismach z listy JCR (baza Web of Science stan na dzień 22.05.2024), mianowicie: *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* (1 artykuł), *Energies* (1 artykuł), *Engineering Failure Analysis* (2 artykuły), *Machines* (1 artykuł), *Aviation* (2 artykuły), *Alexandria Engineering Journal* (1 artykuł). Dane naukometryczne Doktoranta wynoszą odpowiednio 27 cytowań, a indeks Hirscha jest równy 3. **Dorobek publikacyjny, zgodnie z aktualną ustawą, spełnia wymagania stawiane rozprawą doktorskim.**

2. Charakterystyka rozprawy

W pracy przedstawiono badania literaturowe, badania i pomiary eksperymentalne oraz teoretyczne, również obliczenia z użyciem programu Matlab dotyczące projektowania tłumika spiralnego typu odgałęźnego do redukcji pulsacji ciśnienia w wybranych układach hydraulicznych. Pokazano przyczyny występowania nierównomierności wydajności pomp

wyporowych oraz źródeł drgań mechanicznych działających na zawory układu hydraulicznego, również sposoby ich rozwiązania. Zaproponowano rozwiązanie dotyczące kompensacji promieniowej, dla pomp zębatych o zazębieniu wewnętrznym, powodującej zwiększenie sprawności objętościowej maszyny hydraulicznej. Opracowano konstrukcję mikrozaworu wzniosowego oraz wykonano pomiary wpływu zewnętrznych drgań mechanicznych na mikrozawór hydrauliczny. Opracowano również uchwyt do redukcji drgań działających na korpus zaworu mikrowzniosowego. Aby zredukować niekorzystne oddziaływanie zewnętrznych drgań mechanicznych na suwak rozdzielacza hydraulicznego zaproponowano, w pracy, sterowanie suwakiem poprzez napęd śrubowy samohamowny. Przedstawione rozwiązanie ma kilka korzyści, między innymi uniemożliwienie przemieszczania się suwaka rozdzielacza pod wpływem zewnętrznych drgań na korpus rozdzielacza, dokładność sterowania wynikająca z zastosowania silnika krokowego czy oszczędność energii elektrycznej. Dodatkowo zaproponowano zmiany konstrukcyjne rozdzielacza hydraulicznego pozwalające na redukcję oddziaływania zewnętrznych drgań mechanicznych poprzez tłumienie wiskotyczne. Opracowano model matematyczny (quasi-stacjonarny tłumika spiralnego) pozwalający na określenie długości tłumika odgałęźnego o kształcie spiralnym, uwzględniający opory liniowe oraz miejscowe związane z zakrzywieniem przewodu. Zakrzywienie przewodu tłumika pozwala na zmniejszenie jego gabarytów oraz dopasowanie do wolnej przestrzeni wokół pompy wyporowej poprzez zmianę promienia zakrzywienia przewodu. Do wykonywania pomiarów zostało przygotowane stanowisko pomiarowe do badania wpływu zewnętrznych drgań mechanicznych na zawory hydrauliczne. Źródłem zasilania była pompa zębata o zazębieniu zewnętrznym napędzana za pomocą trójfazowego silnika elektrycznego o zmiennej prędkości obrotowej realizowanej przy użyciu przemiennika częstotliwości. Do pomiaru średniego ciśnienia wykorzystano manometr. Zapisy pomiarów oraz sterowanie układem przeprowadzono przy użyciu komputera. Wyniki pomiarów przedstawiono w postaci różnych charakterystyk, jak np. amplitudowo-częstotliwościowych, wpływu zewnętrznych drgań mechanicznych na zawór mikrohydrauliczny czy moduł impedancji początkowej tłumika odgałęźnego dla różnych modeli tarcia w funkcji jego długości. Wykazano, że głównym źródłem pulsacji ciśnienia w układzie hydraulicznym jest pompa wyporowa.

Metodyka badawcza, pomiary, obliczenia oraz opracowanie i analiza otrzymanych wyników nie budzą zastrzeżeń. Podczas recenzowania pracy pojawiło się kilka uwag i pytań, których wyjaśnienie powinno podnieść jakość pracy.

Stwierdzam, że zrealizowany zakres pracy włożonej przez Doktoranta w rozprawie doktorskiej stanowi istotny wkład w rozwój problematyki naukowej dotyczącej redukcji pulsacji ciśnienia w układach hydraulicznych.

3. Uwagi krytyczne, dyskusyjne i ocena redakcyjna rozprawy

Pomimo pozytywnej oceny pracy, zauważono następujące niedociągnięcia:

1. Brak krótkich podsumowań rozdziałów.
2. Brak konsekwencji w stosowaniu międzynarodowego układu jednostek miar SI w pracy, np. str. 76 ciśnienie w barach.
3. W tekście rozprawy brakuje odniesień do poszczególnych rysunków.
4. Czy dokonano porównań, które urządzenia poza pompą wyporową i w jakim stopniu wpływają na generowanie pulsacji ciśnienia? Jeśli tak to jak duże były różnice?

5. Na str. 88-91 w rozprawie doktorskiej opisano rozdzielacz hydrauliczny z napędem śrubowym i podano kilka rozwiązań takich rozdzielaczy (zgłoszenia patentowe). Które z prezentowanych rozwiązań jest najbardziej korzystne i jakie ma wady i zalety w stosunku do pozostałych rozwiązań? Czy były prowadzone badania z użyciem tych wszystkich typów rozdzielaczy hydraulicznych?

6. W podsumowaniu i wnioskach końcowych w pracy nie odniesiono się do sformułowanej tezy, pomimo że jest widoczne jej udowodnienie w uzyskanych wynikach. Proszę o skomentowanie uzyskanych wyników w kontekście sformułowanej tezy.

7. Czy są normy polskie, europejskie dotyczące badań redukcji pulsacji ciśnienia w układach hydraulicznych?

Praca zredagowana i napisana jest w sposób jasny i przystępny dla czytelnika, stosowana terminologia jest poprawna, dobór ilustracji właściwy. Układ tematyczny pracy jest logiczny. Pomimo tego Autor nie ustrzegł się szeregu usterek redakcyjnych jak:

- niewłaściwy styl w niektórych miejscach w pracy,
- występują literówki i zdarzają się powtórzenia tych samych słów w zdaniu.

4. Ocena końcowa rozprawy

Z przedstawionej oceny rozprawy doktorskiej wynika, że podjęty w niej temat, o istotnym znaczeniu poznawczym i użytecznym, został zrealizowany przez Doktoranta na odpowiednio wysokim poziomie. Tematyka pracy i jej zakres dotyczy rozwoju inżynierii mechanicznej. Prezentowane wyniki w pracy zostały dobrze udokumentowane i omówione.

Doktorant w pracy wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną dotyczącą prezentowanego zagadnienia podpartą bogatą literaturą (287 pozycji), którą cytował prezentując swoją rozprawę.

Na podstawie badań eksperymentalnych, pomiarów i obliczeń oraz uzyskanych wyników w pracy mgr inż. Krzysztof Towarnicki wykazał duży zasób wiedzy, zrealizował cele pracy doktorskiej i udowodnił tezę, a kierunki rozważań świadczą o umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Na wartość naukową rozprawy doktorskiej składają się oryginalne rozwiązania problemu naukowego dotyczące kompensacji promieniowej dla pomp zębatych o zazębieniu wewnętrznym (otrzymano 2 patenty), opracowano konstrukcję mikrozaworu wzniosowego oraz uchwyt do redukcji drgań działających na korpus zaworu. Ponadto zaproponowano rozwiązanie konstrukcji zaworu wzniosowego z tłumieniem działających zewnętrznych drgań mechanicznych na element sterujący zaworu – zgłoszenie patentowe. Inne proponowane rozwiązania to sterowanie suwakiem poprzez napęd śrubowy – 3 zgłoszenia patentowe, czy zmiany konstrukcyjne rozdzielacza hydraulicznego pozwalające na redukcję oddziaływania zewnętrznych drgań mechanicznych poprzez tłumienie wiskotyczne, i zakres przeprowadzonych badań.

Otrzymane i prezentowane wyniki badań stanowią bardzo cenny materiał naukowy będący inspiracją do prowadzenia dalszych dociekań i analiz.

Niewątpliwie mocną stroną rozprawy i najważniejszymi oryginalnymi osiągnięciami Doktoranta są zaproponowane nowe rozwiązania dotyczące pompy wyporowej, zębatej,

rozdzielacza hydraulicznego czy zaworu hydraulicznego i związane z tymi nowościami zgłoszenia patentowe i otrzymane już patenty.

5. Wniosek końcowy

W związku z powyższym uważam, że mgr inż. Krzysztof Towarnicki spełnia warunki określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023, poz. 742, z póź. zm.) i wnioskuję o Jego dopuszczenie do publicznej obrony, w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna, przed Radą Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej oraz podjęcie dalszych działań zmierzających do nadania stopnia naukowego doktora.



