



**Politechnika Łódzka**

Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn

Łódź, dnia 10 czerwca 2024 r.

dr hab. inż. Andrzej Kosucki, prof. uczelni  
Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny  
Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn  
90-537 Łódź, ul. Stefanowskiego 1/15

### RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Krzysztofa Towarnickiego  
pt.: „Metoda projektowania tłumika spiralnego typu odgałęźnego do redukcji pulsacji  
ciśnienia w układach hydraulicznych”**

Promotor: dr hab. inż. Michał Stosiak, prof. uczelni  
Promotor: dr Mykola Karpenko, prof. Wileńskiego Uniwersytetu  
Technicznego im. Giedymina

Recenzja została opracowana w oparciu o pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej, z dnia 26 kwietnia 2024 r. (znak: W10/RDND07/41/2024), z informacją o powołaniu mnie na recenzenta pracy doktorskiej mgr. inż. **Krzysztofa Towarnickiego**.

#### **Ogólna charakterystyka i ocena pracy**

Praca reprezentuje dyscyplinę Inżynieria Mechaniczna. Tematykę pracy, związaną z zagadnieniami redukcji pulsacji ciśnienia uważam za aktualną i mającą potencjał aplikacyjny. Podjęcie tej tematyki jest uzasadnione ze względu na rosnące wymagania w stosunku do napędów hydraulicznych, takie jak zapewnienie pewności działania i jakości sterowania, minimalizacji poziomu hałasu czy minimalizacji wymiarów elementów układów hydraulicznych. Przedmiotem rozprawy doktorskiej mgr. inż. Krzysztofa Towarnickiego są zagadnienia pulsacji ciśnienia w układach hydraulicznych, ich źródeł oraz sposobów redukcji. Przedstawiona rozprawa obejmuje zagadnienia teoretyczne - opracowanie modelu matematycznego spiralnego tłumika odgałęźnego, konstrukcyjne – propozycje nowych

konstrukcji rozdzielaczy i zaworów (zgłoszonych do opatentowania z Doktorantem jako współautorem) oraz badania eksperymentalne.

Określono następujące cele pracy: opracowanie modelu matematycznego impedancji tłumika odgałęźnego o kształcie spiralnym, weryfikacja modelu, badania eksperymentalne skuteczności redukcji amplitudy pulsacji ciśnienia dla wybranej częstotliwości wymuszenia z wykorzystaniem zaprojektowanego tłumika spiralnego typu odgałęźnego oraz opracowanie wytycznych do projektowania skutecznych tłumików spiralnych dla wybranych częstotliwości wymuszenia.

Do realizacji celów Doktorant określił zakres pracy, który obejmował poniższe zadania:

- identyfikacja wymuszeń, powodujących zmiany w widmie pulsacji ciśnienia,
- badania eksperymentalne sposobu przenoszenia się drgań na element sterujący mikrozaworu maksymalnego,
- opracowanie modelu uchwytu do redukcji oddziaływań zewnętrznych drgań mechanicznych na korpus zaworu, opracowanie zmian konstrukcyjnych rozdzielaczy suwakowych i zaworów maksymalnych,
- budowa modelu matematycznego pozwalającego na określenie lokalnego minimum impedancji biernego tłumika spiralnego typu odgałęźnego w celu redukcji pulsacji ciśnienia w układach mikrohydraulicznych wynikających z kinematyki pracy pomp wyporowych z uwzględnieniem częstotliwości,
- budowa stanowisk badawczych dla określenia prędkości propagacji fali ciśnienia i modułów sprężystości objętościowej cieczy i przewodu,
- adaptacja układu do określenia wpływu opracowanego tłumika spiralnego typu odgałęźnego,
- badania eksperymentalne tłumika wraz z weryfikacją modelu tłumika oraz określenie jego efektywności.

Rozprawa doktorska mgr. inż. Krzysztofa Towarnickiego liczy 172 strony i składa się z 7 rozdziałów, spisu literatury oraz wykazu ważniejszych oznaczeń stosowanych w pracy. Do rozprawy doktorskiej dołączono streszczenia w języku angielskim i polskim. Struktura pracy jest spójna i logiczna.

W rozdziale 1, zawierającym omówienie stanu badań, Autor po analizie aktualnego stanu wiedzy, nakreślił problem badawczy, formułując tezę pracy: „Możliwa jest redukcja amplitudy pulsacji ciśnienia w układzie mikrohydraulicznym za pomocą odgałęźnego tłumika pulsacji ciśnienia o kształcie spiralnym”. Autor określił też wspomniane powyżej cele i zakres pracy. W rozdziale 2, w celu zapoznania czytelników z poruszonymi zagadnieniami, mgr inż. Krzysztof Towarnicki przedstawia zagadnienia związane z napędami hydrostatycznymi skupiając się na podstawowych elementach i zjawiskach. Rozdział ten dobrze wprowadza w rozdział 3, w którym w sposób usystematyzowany Autor przedstawia zagadnienia pulsacji ciśnienia i wydajności w układach hydraulicznych, wskazując na ich źródła, prezentując opracowane stanowiska badawcze oraz wyniki badań. Jest to najbardziej obszerny rozdział pracy, z dużą liczbą rysunków przedstawiających widma amplitudowo częstotliwościowe, choć bez komentarza skąd właśnie taki wybór. W rozdziale 4, Autor zajmuje się prezentacją stosowanych metod redukcji pulsacji ciśnienia w układach

hydraulicznych uwzględniając dokonania własne oraz przedstawiając patenty i zgłoszenia, których jest współautorem. Rozdział 5 zawiera badania eksperymentalne wyznaczania modułów sprężystości objętościowej cieczy i przewodów oraz prędkości propagacji fali ciśnienia w przewodach, niezbędnych dla przedstawianych w dalszej części rozdziału modeli. Autor przedstawia oprócz modeli dla tłumików prostoliniowych, również metodę autorską dla spiralnego tłumika odgałęźnego. W pracy przedstawiono też badania porównawcze modeli i badania parametryczne modelu tłumika spiralnego wpływu wybranych parametrów na moduł impedancji początkowej. Ta część została zatytułowana: „modelu matematycznego” co nie odwzorowuje treści. W rozdziale 6 zaprezentowane zostało stanowisko badawcze oraz badania porównawcze układów bez tłumika i z tłumikiem prostym z układami z tłumikami spiralnymi o różnych długościach. Autor prezentuje badania eksperymentalne wpływu wybranych parametrów takich jak średnie ciśnienie robocze, temperatura, prędkość obrotowa pompy na pulsacje ciśnienia dla układu z różnymi długościami tłumików spiralnych. Doktorant wprowadził pojęcie efektywności tłumika oraz przedstawił wyniki badań porównawczych. Rozdział 7 podsumowuje całą pracę. Autor nakreśla również kierunki badań rozwojowych stosowania tłumików spiralnych.

W mojej ocenie cele rozprawy zostały osiągnięte. Zakres zagadnień poruszanych w pracy, obejmujących zarówno zagadnienia teoretyczno-obliczeniowe jak i eksperymentalne, wymagał od Doktoranta opanowania zagadnień z szeregu dziedzin. Mgr inż. Krzysztof Towarnicki posiadał wiedzę i umiejętności pozwalające na projektowanie stanowisk badawczych oraz zaplanowanie i przeprowadzenie badań eksperymentalnych. Praca zawiera szereg wartościowych wyników badań eksperymentalnych. Rozprawa stanowi oryginalny wkład w zagadnienia związane z projektowaniem elementów hydrostatycznych układów napędowych. Wartość naukowa i aplikacyjna rozprawy wynika z oryginalnych osiągnięć Doktoranta, z których do najważniejszych zaliczam:

- projekty (jako współautora) prototypowych rozwiązań rozdzielaczy i zaworów hydraulicznych, dla których opracowano zgłoszenia patentowe oraz na dwa z nich uzyskano ochronę patentową,
- poparte badaniami eksperymentalnymi, wykazanie pompy jako głównego źródła pulsacji w układach hydraulicznych,
- opracowanie autorskiego modelu matematycznego pozwalającego na określenie długości tłumika spiralnego odgałęźnego uwzględniającego opory liniowe i miejscowe związane z zakrzywieniem przewodu,
- opracowanie stanowisk badawczych oraz metodyki badań eksperymentalnych,
- sformułowanie celów dalszych badań rozwojowych tłumików spiralnych.

Spis literatury obejmuje 287 pozycji, które wydają się być wprowadzane w dwóch etapach. Pozycje są uporządkowane alfabetycznie w grupach do numeru 262 i ponownie od 263. Kilka pozycji nie jest przytoczonych w tekście, z kolei na stronie 11 jest przywołana pozycja o numerze [306], która nie istnieje. Cytowana literatura zawiera zarówno starsze jak i aktualne pozycje, co wskazuje na dobre rozpoznanie tematyki przez Autora. Wśród przytaczanej literatury Autor wymienia 54 publikacje oraz 10 zgłoszeń patentowych i 2 patenty, w których Doktorant jest autorem lub współautorem.

Należy podkreślić duży wkład pracy Autora zarówno w części dotyczącej analizy dostępnej literatury, jak i badań eksperymentalnych. Nie ma wątpliwości co do samodzielności opracowania zarówno w obszarze związanym z badaniami eksperymentalnymi jak i przedstawionymi modelami.

Praca nie ustrzegła się sformułowań lub zapisów, które wymagają wyjaśnień, komentarza lub poprawy. Są to zarówno drobne błędy redakcyjne czy niekonsekwencje w stosowaniu oznaczeń, jak również zagadnienia merytoryczne, które wymagają uściślenia lub komentarza. Uwagi podzieliłem na merytoryczne i redakcyjne.

### **Uwagi merytoryczne**

1. Str. 5 - dlaczego wzrost intensywności drgań i hałasu jest „niepohamowany” – przecież chociażby działania doktoranta przyczyniają się do hamowania tych zjawisk.
2. Str. 15 – autor pisze o spadkach ciśnienia wynikających z małych średnic przewodów. Co stoi na przeszkodzie zwiększenia tych średnic i jakie to zwiększenie może nieść konsekwencje dla strat ciśnienia w układach?
3. Str. 26 – na rysunku 3 autor przedstawia przebiegi chwilowych wartości wydajności pompy w zależności od liczby tłoczków pompy wielotłoczkowej ( $z=2; z=3; z=4; z=5$ ). Jaki jest tego cel, skoro w akapicie powyżej pisze, że nie produkuje się pomp o liczbie tłoków równej 3, a z zakresu 5-9 wykorzystuje się tylko nieparzyste.
4. Str. 33- rys. 12 – nie jest jasne jak sygnały z elementów sterujących i pomiarowych podłączono do komputera. Brak takiej informacji również w opisie.
5. Na stronie 35 Autor podaje, że amplituda wymuszenia wynosiła 8 [g]. Jak Autor rozumie taki zapis? Jakie były kryteria doboru widm amplitudowo-częstotliwościowych przedstawionych na rysunkach 14-41?
6. Na stronie 66 Autor pisze o badaniach rozdzielacza poddanego wymuszeniom zewnętrznym o częstotliwościach 40, 50 i 60 Hz. Dlaczego przyjęto właśnie te wartości? Jak mają się one do częstotliwości, które mogą się pojawić w układach rzeczywistych?
7. Autor pisze na stronie 79: „Prędkość silnika napędzającego to 1390 [obr/min]...” – Skąd ta prędkość. Jeżeli silnik jest zasilany bezpośrednio z sieci elektrycznej, to prędkość będzie zależna od obciążenia. Jeśli z kolei jest układ sterowania prędkością, to jaka jest motywacja przyjęcia takiej właśnie wartości?
8. Na stronach 88-89 Autor opisuje napęd śrubowy rozdzielacza hydraulicznego. Czy rozpatrywano dla tego rozwiązania przypadek braku zasilania, który w wielu mechanizmach wiąże się z powrotem do położenia neutralnego.
9. Na stronie 98 Autor podaje długość przewodów (800 mm) i promień zakrzywienia spirali ( $R=27$  mm). Ponieważ promień ten wykorzystano również w późniejszych badaniach proszę o wyjaśnienie motywacji zastosowania właśnie takiej wartości.
10. Str. 105 – niezgodność wymiarów równania 5.13 z opisem powyżej. Brak analizy wymiarowej utrudnia czytanie tej części pracy.
11. Doktorant używa pojęć „model quasi-stacjonarny” i „model quasi-ustalony”. Jaka jest różnica, czy też obie te nazwy stosowane są wymiennie?

12. Na str. 115 Autor pisze, że odcinano połączenie układu z manometrem podczas zapisu danych. W jakim celu podjęto takie działanie?
13. W przedstawionym w rozdziale 6 stanowisku brak informacji o parametrach elementów układu pomiarowego. W szczególności brakuje komentarza do piezoelektrycznych czujników ciśnienia, które są decydujące dla poprawnego przeprowadzenia badań. W mojej ocenie z wymogami jakie niosą te czujniki wiąże się również algorytm pomiarów, który Autor pominął.
14. W rozdziale 6, na stronie 117 podano, że długość tłumika spiralnego była zmieniana od 2370 mm do 2860 mm. W dalszej części przyjmowano różne – również krótsze długości tłumików. W mojej ocenie brakuje komentarza dlaczego przyjęto właśnie takie długości tłumików.
15. Z rysunków 125-133 nie wynika wyraźne zmniejszenie pulsacji ciśnienia dla tłumików spiralnych w stosunku do tłumika prostego. Brak komentarza podsumowującego powyższe wykresy.
16. W tabeli 5 i 6 na str. 146 dla temperatur 40°C i ciśnienia średniego 12MPa dla jednakowych długości uzyskano różne wartości efektywności. Czym to może być spowodowane?

### Uwagi redakcyjne

Warstwa edytorska pracy nie jest jej najmocniejszym elementem. W poniższych uwagach pominięto typowe literówki, których jest w pracy dość dużo.

1. Wykaz oznaczeń – przydatnym dodatkiem byłoby uzupełnienie wykazu o jednostki
2. Brak konsekwencji stosowania jednostek, a w większości wzorów ich pominięcie.
3. Str. 5 - jest „...których wielkości nasilenie niekorzystnie wpływa...” powinno być: „...których nasilenie niekorzystnie wpływa...”.
4. Str. 7 - błędne odniesienie do pozycji literaturowej [14].
5. Str. 7 - Autor pisze: „...od natężenia przepływającej cieczy przez zawór, co zostało przedstawiono we wcześniejszym rozdziale.” – we wcześniejszych podrozdziałach brak takiego opisu.
6. Str. 8 – jest „W lit.[19] wstawiono element izolujący...” – raczej chodzi o przedstawienie rozwiązania niż wstawienie do lit.
7. Str. 8 – 13 wiersz od góry – jest „...korpus rozdzielacza a drgającym podłożem...” powinno być „...korpusem rozdzielacza a drgającym podłożem...”
8. Str. 10 – 1 wiersz od góry - jest „występują”; powinno być: „występujące”.
9. Str. 11 – 6 wiersz od góry jest odniesienie do nieistniejącej pozycji literaturowej [306], a w 9 wierszu podwójne wywołanie pozycji [260].
10. Str. 11 – W 8 wierszu od dołu chodzi o nierówności pracy pomp wielotłoczkowych.
11. Str. 21 – pierwszych 7 wierszy drugiego akapitu jest dokładnym powtórzeniem wierszy 13-20 ze strony 11. Jaki jest tego cel.
12. Str. 24 – 10 wiersz w rozdziale 2.7; jest „W tym kierunku należy dławić strumień...” powinno być : „W tym celu należy dławić strumień...”.

13. Str. 27 – 4 wiersz od dołu – jest „...niskimi wartościami współczynnika wydajności”; powinno być: „...niskimi wartościami współczynnika nierównomierności wydajności”.
14. Str. 28 - na rys. 6 przedstawiono porównanie współczynnika nierównomierności wydajności dla różnych typów pomp hydraulicznych – jakkolwiek opis rysunku ułatwiłby jego czytanie, choćby informacja o jakie typy chodzi (+liczka zamiast liczba na rysunku).
15. Str. 78 – 4 wiersz rozdziału 3.4 – jest: „...dalsze rozważania zostaną na przykładzie rozdzielacza suwakowego.”; powinno być: „...dalsze rozważania zostaną przedstawione na przykładzie rozdzielacza suwakowego.”
16. Str. 78 – 3 wiersz od dołu – jest: „przykrycie”; powinno być: „przekrycie”.
17. Str. 64 – 2 wiersz od góry – jest: „różna”; powinno być „równa”.
18. Str. 70 – 1 i 10 wiersz - Jest: „... energia kinematyczna...”; powinno być: „... energia kinetyczna...”.
19. Str. 73 – 3-4 wiersz od dołu - Autor pisze: „Biorąc pod uwagę zalety pompy zębatej o zazębieniu jest najchętniej stosowana wśród zasilaczy hydraulicznych” – o jakie zazębienie chodzi?
20. Str. 75 – rys. 86 – na rysunku są odnośniki nigdzie nie opisane.
21. Str. 85 – rys. 99 - na rysunku są odnośniki nigdzie nie opisane.
22. Str. 90 - 8 wiersz od góry – jest opis pozycji 21 na rysunku 104, która to pozycja na rysunku nie występuje.
23. Str. 96 - 3 wiersz rozdziału 5.1 – jest: „...dla ciśnień rzędu 30-50- MPa, ...”; powinno być: „...dla ciśnień rzędu 30-50- bar, ...”.
24. Str. 96 - Niekonsekwencja w jednostkach we wzorach 5.1 i 5.2. Jeżeli  $\beta$  jest w [1/Pa] to E powinno być w [Pa].
25. Str. 99 – brak jednostek w równaniu 5.3 i jego opisie.
26. Str. 101 - 4 wiersz rozdziału 5.3 - jest: „...ilości elementów...”; powinno być: „...liczby elementów...”.
27. Str. 106 – brak numeru i podpisu rysunku.
28. Str. 107 – Autor pisze: „ $Q_2$  – natężenie przepływu na wyjściu tłumika spiralnego” – tłumik nie ma wyjścia, o czym Doktorant pisze dwa wiersze później.
29. Przy podawaniu wartości np. ciśnień, przepływów itp., jednostki podajemy bez nawiasów kwadratowych.
30. W większości przypadków odniesienia do rysunków nie zawierają ich numerów.
31. Opisy na rysunkach i schematach są różnej jakości i wielkości co powoduje, że niektóre utrudniają czytanie.

Przedstawione powyżej błędy redakcyjno-edycyjne i stylistyczne nie mają wpływu na pozytywną ocenę pracy.

Dorobek mgr. inż. Krzysztofa Towarnickiego (wg. Bazy Scopus stan na 10 czerwca 2024 r.) to współautorstwo 17 publikacji, w tym 12 artykułów w czasopismach z listy czasopism MEiN. Powyższe publikacje cytowano łącznie 46 razy, a indeks h autora wynosi 3. Dorobek doktoranta spełnia zatem wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez ustawę.

### Wniosek końcowy

W wyniku przeprowadzonej analizy stwierdzam, że rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a mgr. inż. Krzysztof Towarnicki wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną i praktyczną w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna jak również umiejętnością samodzielnego prowadzenia prac naukowych. Uważam zatem, że praca mgr. inż. Krzysztofa Towarnickiego pt.: „Metoda projektowania tłumika spiralnego typu odgałęźnego do redukcji pulsacji ciśnienia w układach hydraulicznych” **spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim** w ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2023 poz. 742 z późniejszymi zmianami). Praca może stanowić podstawę do nadania mgr. inż. Krzysztofowi Towarnickiemu stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna i **stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

*A. Kowalczyk*