

Częstochowa, 16.05.2017 r.

Dr hab. inż. Tadeusz Złoto, prof. PCz
Instytut Technologii Mechanicznych
Politechnika Częstochowska

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Piotra Patrosza

pt. „Kompensacja skoków ciśnienia w pompie tłoczkowej o zmiennej wydajności
z rozrządem krzywkowym”

wykonana na zlecenie Prodziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej

1. Charakterystyka pracy

Opiniowana rozprawa doktorska zawiera 167 stron i składa się z dziewięciu rozdziałów, które obejmują: pięć pierwszych rozdziałów, które traktować można jako wprowadzenie do właściwych rozważań, rozdział, gdzie sformułowano tezę rozprawy oraz nakreślono cel i zakres pracy, trzy kolejne rozdziały, gdzie opisano zasadnicze rozważania poświęcone realizacji celu pracy, rozdział „Podsumowanie” oraz trzy załączniki. Ponadto zamieszczono w niej bibliografię, która obejmuje 78 pozycji.

W rozdziale pierwszym pt. „Wprowadzenie” zobrazowano długą historię użytkowania tłokowych pomp wyporowych. Przedstawiono szerokie ich zastosowanie w niemal każdej gałęzi przemysłu, poczynając od lotnictwa, a skończywszy na maszynach mobilnych, podkreślając wysoki stosunek ich mocy do masy. Podkreślono, że w Politechnice Gdańskiej powstały nowe generacje pomp tłokowych z rozrządem krzywkowym autorstwa dr hab. inż. Leszka Osieckiego i prof. dr hab. Andrzeja Osieckiego. Charakteryzują się one dużą gęstością jednostkową mocy i wysoką sprawnością. Ich konstrukcja nie jest jeszcze doskonała. Głównym problemem są występujące znaczne skoki ciśnienia w komorze roboczej pompy, szczególnie wraz ze zmniejszaniem nastawy wydajności. Zagadnienie to jest istotne w kontekście podjętej tematyki badawczej rozprawy i można je traktować jako motywację podjęcia tematu.

W rozdziale drugim scharakteryzowano typowe konstrukcje pomp tłokowych, rodzaje rozrządów w nich stosowanych oraz mechanizmy zmiany wydajności pomp tłoczkowych osiowych z wychylną tarczą. Występujące skoki ciśnienia w tych pompach znacząco wpływają na hałaśliwość i zmniejszają ich trwałość. Jednocześnie przedstawiono różne rozwiązania ograniczające skoki ciśnienia w pompach tłokowych z rozrządem tarczowym, które w mniejszym lub większym stopniu eliminują chwilowe wzrosty ciśnienia, a które z powodzeniem mogłyby być zastosowane w rozrządzie zaworowym, w tym również krzywkowym.

Rozdział trzeci poświęcono opisowi dotyczącemu budowy i zasady działania badanej pompy wielotłoczkowej z rozrządem krzywkowym PWK. Opisano kolejne fazy pracy pompy z maksymalną nastawą wydajności z wykorzystaniem krzywki sterującej. Przedstawiono także mechanizm zmiany wydajności pompy i sposób sterowania krzywką sterującą. Zobrazowano powstające skoki ciśnienia w czasie pracy rozrządu oraz mechanizm

kompensacji tych skoków. Rozdział zakończono konkluzją: „*Główną wadą rozrządu krzywkowego jest fakt, że przy zmniejszaniu wydajności pompy w komorach roboczych pojawiają się bardzo wysokie skoki ciśnienia. Jeśli udałooby się je wyeliminować to pompy PWK w zastosowaniach przemysłowych mogłyby z powodzeniem konkurować z najlepszymi urządzeniami dostępnymi na rynku, zapewniając użytkownikom wysokociśnieniową pompę o stosunkowo niedużej masie oraz gabarytach i bardzo wysokiej sprawności, pracującą w szerokim zakresie prędkości obrotowych*” co należy traktować jako ważną motywację podjęcia tematyki rozprawy.

W rozdziale czwartym dokonano przeglądu literatury obejmującej zagadnienia zjawisk towarzyszących pracy pompy tłoczkowej z rozrządem krzywkowym PWK. Ze względu na brak wyczerpującej literatury dotyczącej innowacyjnej pompy PWK, posłużono się literaturą opisującą zjawiska w typowych pompach wielotłoczkowych.

W rozdziale piątym postawiono następującą tezę pracy: **„Zastosowanie elastycznej komory kompensacyjnej umożliwia obniżenie wartości skoków ciśnienia w komorach roboczych pompy tłoczkowej z rozrządem krzywkowym do wartości nie zagrażającej poprawnemu działaniu urządzenia pracującego w pełnym zakresie regulacji nastawy wydajności, przy ciśnieniu tłoczenia 0 – 40MPa i prędkości obrotowych 500 – 2500 obr/min.”**. Zdefiniowano cel główny, wymieniono szczegółowe zagadnienia obejmujące zakres rozprawy doktorskiej.

Rozdział szósty dotyczy analizy teoretycznej zjawiska skoków ciśnienia występujących w badanej pompie. Przedstawiono szczegółowo czynniki wpływające na wartości skoków ciśnienia. Analizowano modele matematyczne obliczania modułu odkształcenia objętościowego cieczy. Wyprowadzono zależności na zmianę objętości cieczy w procesie sprężania w odciętej komorze roboczej pompy z uwzględnieniem przecieków w poszczególnych parach kinematycznych. W obliczeniach przecieków uwzględniono odkształcenia wybranych elementów pompy z wykorzystaniem metody MES. Analizowano także metodami numerycznymi i na podstawie modeli matematycznych natężenie przepływu cieczy roboczej w szczelinie okna rozrządu w zależności od parametrów eksploatacyjnych i geometrycznych pompy. Zaproponowano kompensację skoków ciśnienia z wykorzystaniem elastycznej komory kompensacyjnej i przeprowadzono symulację przepływu cieczy roboczej z wykorzystaniem oprogramowania CFD.

W rozdziale siódmym opisano budowę i działanie zmodernizowanego stanowiska badawczego. Przedstawiono metodykę badań i rachunek błędów. Zaprezentowano wyniki badań zrealizowanych na tym stanowisku tj. wpływ parametrów eksploatacyjnych pompy na wartości skoków ciśnienia z wysterowaniem krzywki rozrządu w kierunku zgodnym i przeciwnym do kierunku obrotu wału. Poza tym przeprowadzono badania eksperymentalne wpływu wartości średnic otworów kompensacyjnych łączących komorę kompensacyjną z komorami roboczymi na wartości skoków ciśnienia w zależności od parametrów pracy pompy.

W rozdziale ósmym przedstawiono opracowany przez Autora model symulacyjny pracy pompy w programie Matlab - Simulink. Zobrazowano również wyniki badań wartości skoków ciśnienia w zależności od parametrów geometrycznych i eksploatacyjnych pompy i porównano je z wynikami badań eksperymentalnych.

W rozdziale dziewiątym dokonano podsumowania rozprawy, wskazując na jej zasadnicze osiągnięcia oraz zaproponowano dalsze prace nad rozwojem pomp wielotłoczkowych z rozrządem krzywkowym.

2. Ocena pracy

Tematyka rozprawy doktorskiej obejmuje zagadnienia modelowania i analizy zjawisk i procesów towarzyszących powstawaniu i kompensacji skoków ciśnienia, występujących w komorach roboczych pompy wielotłoczkowej z rozrządem krzywkowym. W celu rozwiązania tego złożonego zagadnienia Autor opracował modele matematyczne, przeprowadził badania eksperymentalne i badania symulacyjne z wykorzystaniem oprogramowania Matlab - Simulink.

Wybór tak określonej tematyki badawczej, jako przedmiotu rozprawy doktorskiej, w kontekście także cytowanej przez Autora literatury, uważam za w pełni uzasadniony i ponadto stwierdzam, że Autor swoją rozprawą zrealizował w pełni sformułowane w pracy cele i postawioną tezę.

W mojej ocenie, Autor zastosował bardzo szeroką metodę badawczą. Najpierw opracował modele matematyczne, a następnie wybrane z nich poddał weryfikacji numerycznej w programie CFD. Zmodernizował odpowiednie stanowisko hydrauliczne, które pozwoliło mu na pozyskanie interesujących wyników badań. Na zakończenie pracy zbudował model symulacyjny układu pompy. Bloki tego modelu zawierały w sobie działania matematyczne i podprogramy opisujące poszczególne zjawiska towarzyszące powstawaniu skoków ciśnienia w odciętej komorze roboczej pompy. Na opracowanym modelu prowadził badania symulacyjne zmierzające do określenia skoków ciśnienia w zależności od parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych pompy.

Zakres przeprowadzonych badań oraz uzyskane wyniki scharakteryzowano w punkcie pierwszym niniejszej recenzji, gdzie wymienione zostały podjęte przez Autora działania w ramach realizowanego zakresu rozprawy oraz wyeksponowane najważniejsze osiągnięcia uzyskane w wyniku realizacji podjętych zadań, zarówno w aspekcie badań eksperymentalnych jak i symulacyjnych.

Podsumowując ten opis, do najważniejszych osiągnięć zrealizowanej rozprawy doktorskiej należy zaliczyć:

- opracowanie numerycznych modeli obliczeniowych odkształceń tulei rozrządu i zespołu wał – tarcze oporowe z wykorzystaniem metody MES,
- opracowanie numerycznych modeli obliczeniowych parametrów przepływu cieczy w szczelinie okna rozrządu i w kanale łączącym komorę roboczą z komorą kompensacyjną z wykorzystaniem programu CFD,
- adaptacja stanowiska hydraulicznego do określania skoków ciśnienia w zależności od parametrów eksploatacyjnych pompy i wpływu pola przekroju kanałów kompensacyjnych i kształtu komory kompensacyjnej na wartości skoków ciśnienia,
- opracowanie modelu symulacyjnego do określania skoków ciśnienia w zależności od parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych z wykorzystaniem programu Matlab - Simulink.
- przeprowadzenie szeroko zakrojonych badań wpływu różnych parametrów na wartości skoków ciśnienia.

Analizując zawartość ocenianej rozprawy doktorskiej można stwierdzić, że postawione i zrealizowane w rozprawie zadania mają znaczenie zarówno poznawcze, jak i praktyczne. Do realizacji badań wykorzystano autorskie lub z autorską adaptacją modele obliczeniowe do określania skoków ciśnienia, przy czym na podkreślenie zasługuje także fakt, że przyjęte założenia modelowe mają odpowiednie odniesienie do literatury, a zamieszczone w pracy wyniki badań symulacyjnych dobrze ilustrują zastosowanie opracowanych modeli, potwierdzając prawidłowość sformułowanych wniosków, co stanowi dobrą bazę do dalszych badań.

W odniesieniu do prezentowanych w pracy wyników badań stwierdzam, że wystarczająco dobrze ilustrują one badane zjawiska fizyczne i stanowią podstawę oceny efektywności zastosowanych metod symulacyjnych i eksperymentalnych, a wnioski wynikające z analizy zaprezentowanych wyników są istotne w kontekście rozważanych zjawisk i w większości mogą mieć praktyczne zastosowanie.

Oceniając formę pracy chciałbym stwierdzić, że praca jest napisana bardzo starannie i przejrzysto. Zawiera wiele ilustracji graficznych, w tym wykresów, które ułatwiają właściwą interpretację przedstawianych wyników. Można zauważyć także pewne usterki, z których najbardziej istotne lub przykładowe wymienię w dalszej części niniejszej recenzji, jako uwagi szczegółowe.

Podsumowując oceniam rozprawę jednoznacznie pozytywnie, mimo uwag, które zawarte są w kolejnym rozdziale niniejszej recenzji.

3. Uwagi szczegółowe w tym dyskusyjne

- str. 21 – w zdaniu „Dostępne są w zakresie wydajności od 12 mm^3 do 1000 cm^3 ...” powinno być „Dostępne są w zakresie wydajności od 12 mm^3 do $1000 \text{ cm}^3/\text{obr} \dots$ ”;
- str. 44 – w przyszłości sugeruję zbiorcze cytowania literatury podawać w kolejności rosnącej,
- str. 75 i 76 – dotyczy rysunków 6.28 i 6.29. Brak oznaczeń na początku legend, w pierwszym przypadku b_{ok} , natomiast w drugim p_t . Poza tym w podpisach pod rysunkami „Charakterystyka natężenia przepływu w szczelinie w oknie rozrzędu ...” powinno raczej być „Charakterystyka natężenia przepływu w szczelinie okna rozrzędu ...”;
- str. 77 i 78 – dotyczy rysunków 6.30 - 6.33. Także brak oznaczeń na początku legend, w tym przypadku b_{ok} ,
- str. 82, 83, 85, 86, 88, 93, 113, 114, 116 - 119, 121 - 124, 126 - 129, 131 - 133, 149, 152, dotyczy rysunków: 6.35, 6.36, 6.40 - 6.43, 6.47, 7.20 - 7.38, 8.11, 8.15, 8.16. Brak oznaczeń na początku legend,
- str. 133 – rys. 7.38, brak podpisu dotyczącego rysunków 7.38a i 7.38b i brak oznaczenia początkowego legendy,
- str. 145, 147 i 148 – rys. 8.5, 8.7 i 8.9 brak oznaczeń „a) i b)” na rysunkach i brak oznaczeń na początku legend,

- str. 160 – w podpisie pod rysunkiem 9.4 „Charakterystyka wartości piku ciśnienia w funkcji piku ciśnienia tłoczenia otrzymana ...” powinno być „Charakterystyka wartości piku ciśnienia w funkcji prędkości obrotowej otrzymana ...”,
- a ponadto tekst zawiera także nieliczne błędy tzw. literówki lub inne np.:
 - str. 22 i inne – brak kropek w tytułach po numeracji podrozdziałów, przykładowo jest „2.1 Tłokowe pompy promieniowe” powinno być „2.1. Tłokowe pompy promieniowe”,

Usterki wymienionego typu obniżają w pewnym stopniu ocenę staranności wykonania pracy. Mimo tego typu uchybień pracę należy jednak uznać za wykonaną z dużą starannością, w szczególności także pod względem wysokiej jakości prezentowanych ilustracji graficznych, co w kontekście realizowanej tematyki ma zasadnicze znaczenie.

W celu lepszego wyjaśnienia lub uzupełnienia treści merytorycznej przedstawionej w ocenianej rozprawie, chciałbym postawić Autorowi następujące pytanie:

- W badaniach numerycznych istotne znaczenie na dokładność otrzymywanych wyników ma liczba elementów skończonych lub objętości skończonych przyjętych do analizy. Przyjęcie zbyt małej liczby elementów skutkuje małą dokładnością wyników. Przyjęcie zbyt dużej liczby elementów powoduje wydłużenie czasu obliczeniowego. Czy w pracy dokonano analizy dokładności rozwiązania od gęstości siatki?

4. Wniosek końcowy

Rozważania przedstawione w ocenianej pracy można uznać jako dowód znaczących dokonań i szerokiej wiedzy jej Autora szczególnie w zakresie dyscypliny naukowej: **budowa i eksploatacja maszyn**. Realizacja zadań, podjętych w ramach pracy, wymagała opanowania techniki budowania modeli numerycznych z wykorzystaniem oprogramowania CFD, dużej wiedzy praktycznej koniecznej do odpowiedniego zmodernizowania i obsługi stanowiska badawczego o dużym stopniu złożoności pomiarowej i eksploatacyjnej oraz umiejętności budowania modeli symulacyjnych w programie Matlab - Simulink.

Uważam, że opiniowana rozprawa doktorska pt. „**Kompensacja skoków ciśnienia w pompie tłoczkowej o zmiennej wydajności z rozrządem krzywkowym**”, stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i spełnia z nadmiarem wymogi Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym. Stawiam zatem wniosek o wyróżnienie przedłożonej rozprawy i wnoszę o dopuszczenie pracy do publicznej obrony, a po pozytywnym zakończeniu obrony do nadania **mgr inż. Piotrowi Patroszowi** stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie naukowej: **budowa i eksploatacja maszyn**.