

Prof. dr hab. inż. Czesław Dymarski
Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa
Politechnika Gdańska

Gdańsk, 15.05.2017 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. **Piotra Patrosza**
pt.

Kompensacja skoków ciśnienia w pompie tłoczkowej o zmiennej wydajności z rozrządem krzywkowym

Podstawa opracowania recenzji: Uchwała Rady Wydziału Mechanicznego
Politechniki Gdańskiej w dn. 19.03. 2017 r.

1. Przedmiot recenzji

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy ważnych i aktualnych zagadnień doskonalenia konstrukcji współczesnych pomp tłokowych w celu uzyskania korzystniejszych parametrów ich działania oraz zwiększenia żywotności.

Tłokowe pompy wyporowe są jednym z najstarszych rodzajów pomp, znajdując zastosowanie w ogromnej większości maszyn z napędem hydrostatycznym i będąc nadal przedmiotem badań i udoskonalania ich konstrukcji oraz parametrów pracy. Wynika to z ich istotnych zalet, spośród których wymienić należy możliwość uzyskiwania bardzo wysokiego ciśnienia tłoczenia, nieosiągalnego dla pomp innego typu, przy zachowaniu wysokiej sprawności, a także wysoką gęstość mocy i możliwość zmiany wydajności oraz kierunku tłoczenia. Dzięki tym zaletom znalazły zastosowanie praktycznie we wszystkich gałęziach przemysłu poczynając od górnictwa podziemnego i podwodnego poprzez lądowy i okrętowy, a na lotniczym kończąc, dominując zwłaszcza w hydraulicznych układach zamkniętych.

Jedną z tego typu pomp jest zaprojektowana i zbudowana na Politechnice Gdańskiej przez dr hab. Inż. Leszka Osieckiego i prof. dr hab. inż. Andrzeja Osieckiego pompa tłokowa z rozrządem krzywkowym typu PWK. Szereg prototypów tej pompy w odmianach o stałej i zmiennej wydajności było przedmiotem prac badawczych prowadzonych na Wydziale Mechanicznym w Katedrze Hydrauliki i Pneumatyki. Pozytywne wyniki tych prac dotyczące pomp o stałej wydajności pozwoliły wdrożyć ten rodzaj pomp w firmie Hydrotor S.A. Jednak w przypadku pomp o zmiennej wydajności obok stwierdzenia osiągnięcia przez nie wysokiej sprawności i dużej gęstości mocy ujawniły się niekorzystne zjawiska polegające na dynamicznych skokach ciśnienia w komorze roboczej pompy podczas zmniejszania nastawy wydajności pompy.

Doktorant postawił sobie za cel rozwiązanie tego problemu poprzez realizację następujących zadań badawczych:

- teoretyczna analiza zjawiska powstawania skoków ciśnienia w odciętej komorze roboczej i budowa modeli matematycznych zjawisk mu towarzyszących,
- badania laboratoryjne zjawiska skoków ciśnienia w pompie PWK o zmiennej wydajności,
- badania laboratoryjne skuteczności działania elastycznej komory kompensacyjnej,
- budowa modelu symulacyjnego umożliwiającego dobór parametrów konstrukcyjnych pompy PWK i jej komory kompensacyjnej,

- sformułowanie zaleceń konstrukcyjnych celem minimalizacji wartości skoków ciśnienia w komorach roboczych pompy badanej.

Uwzględniając powyższe należy uznać, że podjęta w rozprawie tematyka jest ważna i aktualna, a próba rozwiązania przedstawionych wyżej problemów w pełni uzasadniona.

2. Ogólna ocena rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa jest bardzo obszerna, zawiera łącznie 203 strony. Składa się z 9 rozdziałów, spisu treści, spisu ilustracji, spisu tabel, wykazu oznaczeń i skrótów, wykazu literatury, zawierającego 76 pozycji i trzech liczących razem 35 stron załączników A, B i C. Pierwszy z nich A zawiera wyniki symulacji CFD (*computational fluid dynamics*) przepływu oleju przez szczelinę w oknie rozrządu, drugi B - schematy blokowe całego układu i podukładów modelu symulacyjnego zjawiska skoków ciśnienia w komorze roboczej badanej pompy wraz ze spisem przedstawionych na nich parametrów, a w trzecim załączniku C – przedstawiony został kod programu do korygowania przebiegów uzyskanych z pomiarów czujnikiem piezoelektrycznym.

W rozdziale 1 pt.: „Wprowadzenie” Autor ukazuje genezę tematyki badawczej związanej z osiowymi pompami tłokowymi. Wymienia ich istotne zalety i wzrastające zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu, czym uzasadnia celowość podjętych przez siebie prac badawczych nad ich dalszym doskonaleniem. Wraz z twórcami nowej osiowej pompy tłokowej z rozrządem krzywkowym uczestniczy w badaniach eksperymentalnych prototypu tej pompy, których wyniki są publikowane [47], [50], [51] i [3]. Ujawnione podczas tych badań niekorzystne zjawiska skoków ciśnienia w komorze roboczej badanej pompy o zmiennej wydajności były dla Autora inspiracją do podjęcia próby rozwiązania tego problemu na drodze dalszych badań teoretycznych i eksperymentalnych prowadzonych w ramach pracy doktorskiej.

Rozdział 2 pt.: „Porównanie konstrukcji pomp tłokowych” zawiera ogólny podział pomp wyporowych i szczegółowy opis różnych rozwiązań konstrukcyjnych pomp tłokowych, przy czym najwięcej uwagi Doktorant poświęcił pompom tłoczkowym osiowym. Przedstawił rysunki i objaśnił zasadę działania kolejno omawianych pomp poczynawszy od pompy promieniowej PL4H firmy Poclain, a następnie pomp osiowych:

- z wychylnym wirnikiem, produkowanych między innymi przez firmę Bumar-Hydroma,
- z wychylną tarczą o stałej wydajności, z rozrządem tarczowym albo zaworowym lub zaworowym sterowanym elektrycznie, produkowanych przez wiele firm; do tej grupy pomp należy także pompa PWK zaprojektowana i badana na Politechnice Gdańskiej,
- z wychylną tarczą o zmiennej wydajności sterowanej mechanicznie, hydraulicznie lub elektrycznie również produkowanych przez wiele czołowych firm.
- z dwoma tarczami wychylnymi i rozrządem zaworowym o stałej wydajności,
- z dwoma tarczami wychylnymi i rozrządem zaworowym o zmiennej wydajności.

Podczas prezentowania zasady działania pomp osiowych o zmiennej wydajności Doktorant przedstawił i wyjaśnił zasadę działania regulacji zmiany wydajności pompy prezentując przy tym schematy hydrauliczne i charakterystyki regulatorów stałego ciśnienia, stałej mocy oraz load-sensing. Ponadto opisał w sposób przejrzysty zjawiska występowania skoków ciśnienia zwłaszcza w pompach z rozrządem zaworowym oraz dotychczasowe sposoby niwelowania tego niekorzystnego zjawiska przez czołowych producentów tego typu pomp.

Rozdział 3 pt.: „Budowa i zasada działania pompy PWK” stanowi dokładny opis rozwiązania konstrukcyjnego zdwojonej wielotłoczkowej prototypowej pompy osiowej z dwoma pochyłymi tarczami, z rozrządem krzywkowym, będącej przedmiotem badań

Doktoranta. Na początku Autor przedstawił bardzo starannie wykonany rysunek złożeniowy pompy w przekroju osiowym z oznaczeniem wszystkich istotnych elementów i zaznaczeniem kolorami: czerwonym, niebieskim i żółtym kanałów tłocznych, ssących i drenażowych, co znakomicie ułatwia zrozumienie działania pompy. Pozostała część rozdziału została podzielona na cztery następujące podrozdziały,

- 3.1. Mechanizm rozrządu pompy, w którym dokładnie opisał działanie zastosowanego w badanej pompie rozrządu zaworowego sterowanego mechanicznie. Dla lepszego zrozumienia pokazał na kolorowym rysunku wzajemne położenie elementów składowych tego mechanizmu kolejno w czterech fazach jego pracy, zaznaczając trzema wymienionymi wyżej kolorami połączenia komory roboczej i tym samym panujące w niej ciśnienie oleju. Ponadto przedstawił równanie opisujące przemieszczenie tulei rozrządu w funkcji kąta obrotu wału i przebieg tego przemieszczenia.
- 3.2. Mechanizm zmiany wydajności pompy, w którym dokładnie wyjaśnił na czym polega dodatkowa funkcja krzywki rozrządu, która oprócz sterowania ruchem tulei rozrządu umożliwia również zmianę nastawy wydajności lub nawet zmianę kierunku tłoczenia pompy. Podobnie jak w poprzednim podrozdziale doktorant przedstawił rysunki położenia elementów rozrządu z zaznaczeniem kolorami ciśnienia w komorze roboczej dla ośmiu faz pracy pompy przy zmniejszonej wydajności. Widoczne są na nich nadmierne wartości ciśnienia w komorze roboczej w chwili jej zamknięcia podczas sprężania cieczy i spadku ciśnienia (kawitacji) podczas zasysania cieczy. Autor przedstawił również schemat kinematyczny mechanizmu zmiany wydajności pompy z rozrządem napędzającym krzywkę silnikiem elektrycznym krokowym poprzez przekładnię planetarną oraz wyniki pomiarów ciśnienia w komorze roboczej pompy PWK bez kompensacji dla trzech nastaw wydajności: 100%, 60% i 20%, co wyraźnie ukazuje rangę omawianego problemu.
- 3.3. Mechanizm kompensacji skoków ciśnienia, w którym Doktorant prezentuje własnego pomysłu nieznaczne zmiany w konstrukcji pompy, które nie powinny mieć istotnego niekorzystnego wpływu na działanie pompy, a powinny znacząco zmniejszyć zaobserwowane skoki ciśnienia podczas pracy przy mniejszych nastawach wydajności. Idea tych zmian polega na utworzeniu pewnych zamkniętych przestrzeni zwanych kompensacyjnymi, które w czasie odcięcia komór roboczych łączyłyby krótkimi otworkami te komory z przestrzeniami kompensacyjnymi, co dzięki zwiększeniu w ten sposób objętości cieczy sprężanej powinno w znaczny sposób zmniejszyć skoki ciśnienia.
- 3.4. Główne zalety i wady pompy PWK, w którym Autor ukazuje istotne zalety badanej pompy o zmiennej wydajności, w tym:
 - bardzo wysoką sprawność objętościową, co osiągnięto dzięki zastosowaniu dodatknych przekryć w rozrządzie, zastosowaniu dławika śrubowego na dopływie cieczy pod stopkę tłoczka oraz przez zmniejszenie martwej objętości między przemieszczającymi się do siebie tłoczkami,
 - wysoką sprawność mechaniczno-hydrauliczną, osiągniętą dzięki hydrostatycznemu odciążeniu rozrządu i zastosowaniu nie obracającego się bloku cylindrowego, co pozwoliło na wykonanie w nim krótszych i o większym przekroju kanałów olejowych oraz wyeliminowało działanie promieniowych sił bezwładności tłoczków,
 - mały ciężar i gabaryty oraz wysokie ciśnienia tłoczenia (50MPa) i wysoki współczynnik gęstości mocy dorównujący pompom czołowym producentów takich jak Linde, Parker czy Bosch-Rexroth,
 - możliwość zastąpienia serwomechanizmów sterujących silnikami krokowymi z przekładnią mechaniczną, co wraz z wcześniej wymienionymi zaletami i możliwością tłoczenia oleju w obu kierunkach predestynuje te pompy do zastosowań mobilnych.

Zasadniczą wadą tych pomp hamującą ich wdrożenie i szersze zastosowanie jest zadaniem Autora występowanie skoków ciśnienia podczas pracy z ograniczoną wydajnością. Prowadzenie prac badawczych nad rozwiązaniem tego problemu jest w pełni uzasadnione.

Rozdział 4 pt.: „Analiza literatury” zawiera wykaz pozycji literatury różnych autorów, a także własnych lub wspólnych publikacji, z której Autor korzystał podczas realizacji kolejnych etapów pracy. Znaczna część z nich [26, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 40, 43, 44, 45, 47, 48, 49, 50, 51, 55, 56] dotyczyła opisu budowy prototypu badanej pompy z dokładnym wyjaśnieniem działania jej podzespołów, w tym rozrządu krzywkowego oraz zjawisk towarzyszących jego funkcjonowaniu i ich modelowaniu, a także zawierała wyniki badań laboratoryjnych. Podobnie liczne publikacje [4, 5, 6, 7, 22, 23, 24, 52, 53, 54, 57, 58, 60, 65, 67, 68] zawierały opis zasady działania i wyniki badań innych pomp wporowych. Cenne informacje o modelowaniu własności cieczy można było pozyskać z prac [8, 9, 10, 12, 13, 14, 63, 69], zaś o modelowaniu działania pomp i zjawisk w nich występujących z prac [11, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 40, 54, 62, 72, 75, 76, 77, 78].

W **rozdziale 5** pt.: „Teza i cel pracy” Autor na podstawie swoich dotychczasowych analiz i badań eksperymentalnych formułuje następującą tezę: *Zastosowanie elastycznej komory kompensacyjnej umożliwia obniżenie wartości skoków ciśnienia w komorach roboczych pompy tłoczowej z rozrządem krzywkowym do wartości nie zagrażającej poprawnemu działaniu urządzenia pracującego w pełnym zakresie regulacji nastawy wydajności, przy ciśnieniach tłoczenia 0 - 40MPa i prędkościach obrotowych 500 - 2500 obr/min.*

Za cel swojej pracy przyjmuje obniżenie wartości skoków ciśnienia do poziomu zapewniającego poprawną pracę pompy przy dowolnej nastawie wydajności z zakresu 0 - 100% tak, by jej parametry eksploatacyjne co najmniej dorównywały parametrom pomp czołowych producentów takich jak: Bosch-Rexroth, Parker, Danfoss czy Linde. Ten ambitny cel chce osiągnąć poprzez realizację następujących zadań:

- teoretyczna analiza zjawisk powstawania skoków ciśnienia w odciętej komorze roboczej i budowa modeli matematycznych tych zjawisk,
- badania laboratoryjne wymienionego zjawiska w pompie PWK,
- badania laboratoryjne skuteczności działania elastycznej komory kompensacyjnej,
- budowa modelu symulacyjnego umożliwiającego ocenę wariantów wprowadzanych zmian parametrów konstrukcyjnych pompy,
- sformułowanie wybranych najkorzystniejszych zmian konstrukcyjnych warunkujących wymaganą minimalizację skoków ciśnienia w komorach roboczych pompy.

Rozdział 6 pt.: „Opis teoretyczny zjawiska skoków ciśnienia” zawiera dokładną analizę pracy zespołu rozrządu pompy z uwzględnieniem przebiegu zmian parametrów geometrycznych, prędkości tych zmian i wywołanych nimi przepływów cieczy i zmian ciśnienia dla różnych nastaw wydajności, ciśnienia tłoczenia, prędkości obrotowej wału oraz lepkości cieczy i temperatury.

W analizach swoich Doktorant uwzględnił ściśliwość cieczy roboczej i prawidłowo uzasadnił wybór izentropowego stycznego modułu, przy czym na podstawie przytoczonej literatury uznał za celowe przyjąć do dalszych rozważań empiryczne modele matematyczne modułu będące funkcją lepkości kinematycznej, temperatury i ciśnienia. Z uwagi na to, że wymieniony moduł odkształcenia objętościowego dotyczył oleju niezapowietrzonego, trudnego do uzyskania w praktyce Doktorant uznał za konieczne wprowadzić do równania współczynnik stopnia zapowietrzenia oleju. W tym celu dokonał analizy porównawczej przedstawionych w literaturze naukowej modeli modułu w funkcji zapowietrzenia i wybrał do dalszych prac model Cho, który wykazał zadowalającą zbieżność z wynikami badań [8].

Kolejnym istotnym czynnikiem, który musiał być uwzględniony w opisie zjawiska skoków ciśnienia jest zmiana objętości przestrzeni odciętej komory roboczej. Na podstawie znajomości parametrów geometrycznych zespołu rozrządu Doktorant wyznaczył zależność matematyczną na objętość cieczy w chwili rozpoczęcia sprężania cieczy w komorze oraz w chwili jego zakończenia, kiedy następuje otwarcie połączenia komory roboczej z kanałem tłocznym dla określonych przekryć i nastawy wydajności pompy. Po podstawieniu tych zależności do wzoru na moduł ściśliwości otrzymał przyrost ciśnienia w komorze roboczej przy założeniu jej pełnej szczelności.

W badanej pompie ciecz z odciętej komory roboczej może w niewielkiej ilości wydostawać się poprzez szczeliny w trzech węzłach konstrukcyjnych, a mianowicie:

- na podporze hydrostatycznej tłoczka,
- między tłoczkiem i tuleją rozrządu,
- na mostku rozrządu na długości przekrycia dodatniego.

Doktorant te trzy węzły konstrukcyjne źródeł przecieków przedstawił w bardzo przejrzysty sposób za pomocą kolorowych rysunków z ukazaniem kanałów przepływu i rozkładu ciśnienia. Następnie uzasadnił w klarowny sposób przyjęte modele i przedstawił zależności matematyczne dla każdego z tych źródeł, w których uwzględnił także deformacje kształtu szczelin wywołane odkształceniami sprężystymi elementów, na które oddziałuje ciśnienie cieczy. Do wyliczenia tych odkształceń posłużył się MES, zaś do przepływów, obliczeniami CFD. Dzięki temu uwidocznione zostały i uwzględnione w obliczeniach miejscowe zmiany rodzaju przepływu, co w znacznym stopniu zwiększyło dokładność otrzymanych wyników. Należy podkreślić, że modelowanie przecieków w oknie rozrządu musiało być oddzielne dla okna łączącego komorę roboczą z kanałem ssącym, w którym panowało w miarę stałe ciśnienie i dla okna łączącego z kanałem tłocznym, do którego przepływ pojawiał się tylko podczas wystąpienia skoku ciśnienia.

Jeszcze innym czynnikiem wpływającym na skoki ciśnienia są zmiany skoku tłoczków wywołane odkształceniami zespołu wał tarcze oporowe. W celu identyfikacji skali tego zjawiska i oceny jego wpływu na wartość skoków ciśnienia Doktorant przeprowadził symulacje MES przy zastosowaniu modelu bryłowego. Obliczenia przeprowadził dla różnych kątów ustawienia kąтового krzywki względem wału.

Ostatnim, bardzo ważnym czynnikiem mającym wpływ na wartości skoków ciśnienia ma zastosowanie w konstrukcji pompy komór kompensacyjnych połączonych z komorą roboczą, co zdaniem Doktoranta jest działaniem dającym duże szanse zminimalizowania ich do akceptowalnych wartości. W celu wyznaczenia tego wpływu zamodelował obie komory i łączący je kanał i korzystając z oprogramowania CFD wyznaczył linie prądu i rozkład prędkości cieczy w kanale i komorach oraz współczynnik oporów lokalnych. Obliczenia te wykonał dla sześciu wartości ciśnienia oraz trzech wartości średnicy kanału i lepkości oleju. Korzystając z zagadnienia Lamego wyprowadził zależność na zmianę objętości komory kompensacyjnej, a następnie na wartości ciśnienia w komorze roboczej możliwe do rozwiązania metodą numeryczną.

Rozdział 7 pt.: „Badania eksperymentalne” stanowi obszerny opis stanowiska laboratoryjnego do badań pompy. Doktorant przedstawił w nim schemat układu hydraulicznego i fotografie podstawowych zespołów stanowiska, rodzaj przyrządów pomiarowych i sposób pomiaru następujących wielkości:

- temperatury oleju w zbiorniku,
- prędkości obrotowej - za pomocą czujnika optycznego i zamocowanej na wale tarczy z otworami oraz przetwornika przeliczającego liczbę impulsów na prędkość obrotową,
- momentu obrotowego – momentomierzem firmy HBM zamontowanym na wale pompy,

- natężenia przepływu – przy wykorzystaniu przepływomierza tłokowego PT-200 o wysokiej dokładności klasy 0.2,
- ciśnienia w przewodach tłocznych ssawnym – manometrami tensometrycznymi klasy 0.2,
- ciśnienia w komorze roboczej – za pomocą czujnika piezoelektrycznego CP umieszczonego wewnątrz korpusu pompy i połączonego z komorą roboczą kanałami o zmieniającej się długości, przy czym sygnał z czujnika przesyłany był poprzez wzmacniacz PA-3000 firmy EC Electronics i moduł akwizycji danych NI-6210 firmy National Instruments do komputera, w którym za pomocą programu Lab View dane zapisywane były w formacie tekstowym. Należy zaznaczyć, że ten pomiar w przypadku gwałtownego wzrostu mierzonego ciśnienia mógł błędnie wskazywać zamiast dodatnich, ujemne wartości ciśnienia. Korektę wskazań Doktorant zrealizował za pomocą własnego opracowanego specjalnie do tego celu programu komputerowego opartego na porównaniu czujnika piezoelektrycznego w obwodzie pomiarowym do kondensatora wpiętego w obwód elektryczny. W celu automatyzacji procesu korekcji przebiegów z bardzo licznymi punktami pomiarowymi Autor napisał program komputerowy o nazwie Press-Kor w języku C# wykorzystującym platformę .NET [27], którego opis i schemat blokowy zamieścił w pracy.

W oparciu o dane producentów analogowych instrumentów pomiarowych Dyplomant obliczył maksymalne błędy pomiarów wszystkich wymienionych wyżej mierzonych wielkości, korzystając z przedstawionej w literaturze [29] zależności, uwzględniającej zakres pomiarowy, klasę przyrządu pomiarowego i dokładność odczytu. Jednak w przypadku pomiaru ciśnienia w komorze roboczej na wynikową wartość błędu mają wpływ błędy wszystkich przyrządów układu pomiaru tego parametru, czyli: czujnika ciśnienia, wzmacniacza, modułu akwizycji danych, i komputera.

Parametry użytych do pomiaru przyrządów oraz obliczone maksymalne wartości błędów mierzonych wielkości Autor przedstawił w tabeli.

Następnie wyjaśnił i przedstawił na schemacie blokowym metodykę prowadzonych badań pompy na stanowisku laboratoryjnym. Uznał za celowe przeprowadzenie w pierwszej kolejności badania wpływu parametrów eksploatacyjnych na skoki ciśnienia w pompie bez połączenia komór roboczych z komorą kompensacyjną, ale tylko w ograniczonym zakresie z uwagi na bardzo silne zjawiska skoków ciśnienia. Drugą serię pomiarów przeprowadził dla pompy z komorą kompensacyjną połączoną z komorami roboczymi kanałkiem o średnicy 1mm, ale z uwagi na nieznaczną tylko poprawę pracy wykonał kolejną serię pomiarów z komorą kompensacyjną połączoną z komorami roboczymi pojedynczym kanałkiem o średnicy 1,4 mm, uzyskując wyraźną poprawę jakości pracy pompy. Wyniki z tej serii pomiarów przedstawił w postaci wykresów zmian wartości pików ciśnienia kolejno w funkcji nastawy wydajności, prędkości obrotowej wału, ciśnienia tłoczenia, oraz temperatury oleju i lepkości oleju dla dwóch wariantów wysterowania krzywki rozrządu, a mianowicie: w kierunku zgodnym i niezgodnym z kierunkiem obrotu wału. Wszystkie zamieszczone w pracy wykresy wykonane zostały w sposób przejrzysty i bardzo starannie.

Następnie Doktorant wykonał pomiary wartości skoków ciśnienia w komorach roboczych w funkcji ilości i łącznego przekroju kanałów łączących komorę kompensacyjną z roboczą dla różnych prędkości obrotowych wału, nastaw wydajności oraz temperatur oleju dla dwóch kierunków wysterowania krzywki rozrządu.

Na koniec badań eksperymentalnych zaproponował pięć wariantów konstrukcyjnych tulei kompensacyjnych różniących się sztywnością i objętością. Pomiary pracy pompy wykonał dla dwóch skrajnie różniących się wariantów tulei, a mianowicie: tulei o najmniejszej objętości i największej sztywności, oraz tulei o dużej objętości i małej sztywności. Niestety wyniki pomiarów skoków ciśnienia były bardzo zbliżone i mieściły się w granicach błędu pomiaru. Doktorant próbuje w sposób logiczny wytłumaczyć ten fakt, podając dwie możliwe przyczyny.

We wnioskach podsumowujących wyniki badań eksperymentalnych Autor przyznaje, że dotychczasowe zmiany konstrukcyjne pompy zwłaszcza w części dotyczącej komór kompensacyjnych nie przyniosły oczekiwanego rozwiązania problemu, ale wyraźnie ukazały celowość prowadzenia badań i pewnych zmian konstrukcyjnych w kierunku dalszego zmniejszenia skoków ciśnienia na drodze zwiększenia przekroju kanałów kompensacyjnych.

W rozdziale 8 pt.: „Symulacja skoków ciśnienia w komorze roboczej” Doktorant przedstawił opracowany przez siebie, na podstawie wcześniej omówionych równań, model symulacyjny w programie Matlab Simulink. Program ten stanowi bardzo cenne narzędzie badawcze dla projektanta. Umożliwia bowiem mniejszym kosztem i w krótszym czasie ocenić wpływ zmian wartości wybranych parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych pompy na wartość skoków ciśnienia już na etapie projektowania. Opracowany model jest modelem dyskretnym o skończonej długości kroku czasowego. Jest złożony, bowiem uwzględnia wiele parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych oraz właściwości fizyczne cieczy roboczej. Autor przedstawił ideowy schemat blokowy oraz opis działania modelu i tok realizowanych obliczeń. Wykorzystując opracowany program wyznaczył przebiegi zmian istotnych parametrów podczas sprężania cieczy w odciętej komorze roboczej w funkcji czasu. Następnie w celu porównania wyników symulacji z wynikami badań eksperymentalnych dla oceny poprawności modelu symulacyjnego wyznaczył i przedstawił na wykresach charakterystyki skoków ciśnienia w funkcji tych samych parametrów eksploatacyjnych i konstrukcyjnych, a także dla dodatkowych wartości parametrów konstrukcyjnych, które nie mogły być zastosowane w badanej pompie. Chodzi tu między innymi o większe średnice kanałów łączących komory robocze z kompensacyjną, szerokości okien i większe objętości komór kompensacyjnych.

W zakończeniu tego rozdziału Doktorant wymienia szereg dodatkowych czynników, które zostały pominięte w modelu z uwagi na ich, wg Jego oceny, znikomy wpływ na analizowane zjawiska lub brak o nich informacji w dostępnej literaturze, a także których wartości zostały przyjęte na podstawie literatury nie precyzującej, a jedynie określającej pewien zakres tych wartości.

W rozdziale 9 pt.: „Podsumowanie” Doktorant wymienia wykonane i przedstawione w poprzednich rozdziałach prace dotyczące badań eksperymentalnych i numerycznych prototypu pompy PWK o zmiennej wydajności w tym wykonane analizy i budowy modeli matematycznych procesów i zjawisk głównie mechanicznych i hydraulicznych, zarówno statycznych jak i dynamicznych zachodzących w podzespołach i zespołach badanej pompy. Modele te posłużyły mu do opracowania całościowego modelu symulacyjnego procesu sprężania cieczy w komorze roboczej pompy i wykonania symulacji wpływu parametrów eksploatacyjnych i konstrukcyjnych na skoki ciśnienia w komorach roboczych pompy. Otrzymane w ten sposób wyniki porównał z wynikami badań eksperymentalnych, co umożliwiło ocenę poprawności modelu symulacyjnego. Maksymalna różnica nie przekraczała 5 MPa, a średnia wynosiła około 2 MPa, co praktycznie umożliwia już wykorzystanie tego modelu do testowania wpływu wprowadzanych zmian zwłaszcza parametrów konstrukcyjnych pompy na obniżenie wartości skoków ciśnienia.

Na zakończenie rozdziału Autor wskazuje na celowość prowadzenia dalszych prac związanych z budową nowego prototypu pompy ze wskazanymi zmianami konstrukcyjnymi tak, by mógł on być przebadany na istniejącym stanowisku zarówno co do poprawności działania jak i trwałości pompy. Pozytywne wyniki takich badań oraz wykonanie analizy optymalizacyjnej pod kątem technologiczno-ekonomicznym i dobór regulatorów nastaw jej wydajności pozwoliłoby na wdrożenie jej do produkcji.

Praca napisana została poprawnie pod względem językowym z bardzo starannie i przejrzysto wykonanymi rysunkami i wykresami dzięki czemu precyzyjnie prezentuje zawarte w niej treści merytoryczne. Autor jednak nie ustrzegł się pewnych błędów i pomyłek, w tym także stosowania jednostek spoza obowiązującego nas układu miar SI różnych wymienianych parametrów, których wykaz przedstawiłem poniżej.

3. Uwagi szczegółowe

Wykaz uwag dotyczących dostrzeżonych w treści pracy błędów i pomyłek.

1. Str. 15 – jest: n [obr/min] – powinno być: n [obr/s],
2. Str. 17 – jest: ν [mm²/s] – powinno być: ν [m²/s].
3. Str. 19 – szkoda, że Autor wymieniając rodzaje gałęzi przemysłowych wykorzystujących napędy hydrauliczne nie wymienił przemysłu okrętowego i offshore, gdzie ten rodzaj napędu musi spełniać najtrudniejsze zadania i rozwija się najbardziej dynamicznie.
4. Str. 27 – w opisie pod rys. 2.8 jest: 8 – łożysko wzdłużne – powinno być: 8 – łożysko poprzeczne lub poprzeczno-wzdłużne.
5. Str. 31 – w opisie pod rys. 2.14 jest: 4 – silnik elektryczny – należałoby podać: 4 – silnik elektryczny sterowania wydajnością pompy.
6. Str. 37 – linia odnośnika 15 nie dochodzi do tulei kompensacyjnej, a jedynie do dławika śrubowego.
7. Przy omawianiu pomp z obracającym się wirnikiem należałoby wspomnieć o wpływie sił odśrodkowych działających na tłoczki.
8. Str. 41 – w opisie pod rys. 3.7 należało podać także wartość ciśnienia tłoczenia dla przedstawionych przebiegów ciśnień.
9. Str. 42 – pisząc o zastosowaniu dławika śrubowego należałoby krótko uzasadnić jego wybór.
10. Str. 57 – we wzorze 6.27 jest pomyłka w drugim członie – zamiast: $(2,2+1,8\alpha-b)/0,34r$ powinno być: $(2,2+1,8\alpha-b/r)/0,68$.
11. Str. 60 – pod rys. 6.8 jest: S – kanał tłoczny – powinno być: S – kanał ssący; ponadto nie zaznaczono kolorami kanałów ssącego i tłocznego poniżej tulei rozrzędu.
12. Str. 70 – wzór 6,64 – określa grubość ścianki tulei, a powinien określać luz promieniowy.
13. Str. 70 – ostatnie zdanie: – założenie, że szczelina tłoczek – tuleja będzie mimośrodowa powinno być, moim zdaniem, lepiej uzasadnione.
14. Str. 107 – w tabeli 7.2 część jednostek mierzonych parametrów jest spoza układu miar SI.
15. Str. 108 – drugie zdanie - pisząc o uruchamianiu stanowiska badawczego należałoby podać przy jakich wartościach parametrów się to odbywało i w jakim obiegu.
16. Str. 116 – rys. 7.24 - moim zdaniem przedstawianie porównawcze wykresów przebiegów mierzonych tych samych parametrów i w tej samej funkcji powinno się przedstawiać dla tych samych zakresów współrzędnych, ponieważ to lepiej uwidacznia różnice wyników. Ta uwaga dotyczy także rys 7.25 i jeszcze innych zamieszczonych w recenzowanej pracy.
17. Str. 125 – ostatnie zdanie – jest : wpływ ten jest znacznie wyższy.. – powinno być: wpływ ten jest znacznie większy..
18. Str. 145 – pierwsze zdanie – jest: rys. 8.6 - powinno być: 8.5.
19. Str. 149 – pierwsze zdanie rozdz. 8.2.2 jest: zweryfikowaną – powinno być: zweryfikowane.
20. Str. 150 – w szóstym wierszu pominięto słowo : roli.

21. Str. 150 – opis pod rys. 8.13 powinien zawierać informację dla jakiej wysokości szczeliny wyznaczono przedstawiony przebieg.
22. Str. 151 – przedostatni wiersz – pominięto słowo: czy.
23. Str. 154 – piąty wiersz nad rysunkiem – pominięto słowo : nie.

4. Ocena merytoryczna pracy

Zawarte w rozprawie treści są zgodne z jej tytułem. Podział pracy na rozdziały jest logiczny, zgodny z kolejnością realizowanych zadań badawczych i odpowiada nazwom tych rozdziałów, co czyni całą pracę bardziej przejrzystą. Obszerny wykaz literatury zawiera 77 cytowanych w pracy pozycji, spośród których 53 zostało opublikowanych po 2000 roku, w tym 28 – po 2009 roku. Świadczy to o dobrej znajomości przez Doktoranta aktualnej problematyki naukowo badawczej dotyczącej tematycznie rozprawy, co podnosi jej wartość.

Przedstawione w rozprawie prace badawcze w tym:

- przeprowadzenie szczegółowej analizy rozwiązania konstrukcyjnego i zasady działania poszczególnych mechanizmów prototypu badanej pompy osiowej pompy tłokowej PWK z rozrządem zaworowym krzywkowym o zmiennej wydajności,
- analiza zjawisk mechanicznych i hydraulicznych zarówno statycznych jak i dynamicznych występujących w różnych podzespołach pompy podczas poszczególnych faz pracy i budowa lub wybór z najnowszej literatury najbardziej odpowiednich modeli matematycznych opisujących te zjawiska,
- wykonanie badań eksperymentalnych wpływu parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych na skoki ciśnienia w komorze roboczej pompy podczas sprężania cieczy w momencie hydraulicznego odcięcia tej komory,
- opracowanie programu Press-Kor do korygowania wskazań czujnika piezoelektrycznego w układzie pomiaru ciśnienia w komorze roboczej pompy,
- wyznaczenie maksymalnych błędów poszczególnych pomiarów,
- opracowanie całościowego modelu symulacyjnego w programie Matlab Simulink procesu sprężania cieczy w komorze roboczej pompy i wykonania symulacji wpływu parametrów eksploatacyjnych i konstrukcyjnych na skoki ciśnienia w komorach roboczych pompy, co po porównaniu otrzymanych w ten sposób wyników z wynikami eksperymentalnymi pozwoliło stwierdzić zadawalającą ich zgodność,
- wykorzystując opracowany i sprawdzony model symulacyjny wyznaczenie czterech parametrów konstrukcyjnych w badanej pompie, których zmiana wartości do zaproponowanych przez Autora zaowocowała otrzymaniem wyników symulacji z radykalnie zmniejszonymi skokami ciśnienia w komorze roboczej do poziomu nie zagrażającego poprawności jej działania,

stanowią pomyślną realizację kolejnych zadań badawczych niezbędnych dla osiągnięcia celu recenzowanej pracy i udowadniają sformułowaną przez Doktoranta w rozdziale 5 tezę.

5. Wniosek końcowy

Recenzowana dysertacja doktorska mgr inż. Piotra Patrosza stanowi samodzielne i oryginalne opracowanie naukowe dotyczące aktualnej oraz bardzo przydatnej tematyki badawczej, a przy tym mające dużą wartość poznawczą i użyteczną. Poziom przedstawionych w niej analiz występujących w badanej pompie zjawisk oraz opracowanych modeli matematycznych, a także programów i symulacji komputerowych jest wysoki. Moim zdaniem część z wymienionych opracowań, a mianowicie:

– modele przecieków w szczelinach o zmiennej geometrii,

matematycznych, a także programów i symulacji komputerowych jest wysoki. Moim zdaniem część z wymienionych opracowań, a mianowicie:

- modele przecieków w szczelinach o zmiennej geometrii,
 - model elastycznej komory kompensacyjnej,
 - model odkształceń zespołu wał - tarcze oporowe,
 - program Press-Kor do korygowania wskazań czujnika piezoelektrycznego mierzącego ciśnienie w komorze roboczej pompy oraz
 - całosciowy model symulacyjny procesu sprężania cieczy w komorze roboczej pompy,
- można uznać za oryginalne prace twórcze Autora, co najlepiej świadczy o Jego szerokiej wiedzy i umiejętności prowadzenia badań naukowych z wykorzystaniem najnowszej wiedzy i narzędzi badawczych.

Podsumowując stwierdzam, że opracowana przez mgra inż. Piotra Patrosza rozprawa doktorska pt. **Kompensacja skoków ciśnienia w pompie tłoczkowej o zmiennej wydajności z rozrządem krzywkowym** spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim zgodnie z USTAWĄ z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz. U. z dnia 16.04.2003r.).

Stawiam wniosek o do dopuszczenie Doktoranta do publicznej obrony pracy.

Jednocześnie, biorąc pod uwagę wymienione wcześniej, zawarte w rozprawie istotne, twórcze osiągnięcia Autora wnioskuję o jej wyróżnienie.

