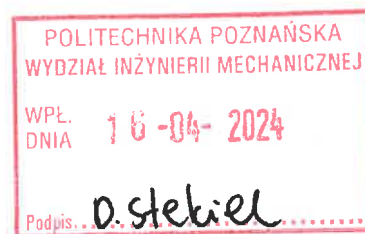


dr hab. inż. Sławomir Kciuk, prof. PŚ.  
Katedra Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej  
Politechnika Śląska



**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**  
**mgr. inż. Michała Zielinskiego**

pod tytułem:

*„Wolnoobrotowa promieniowa pompa tłokowa o zmiennej wydajności  
właściwej – budowa i badania”*

Podstawa opracowania: Uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej nr 5/III/01/2024, z dnia 29 stycznia 2024r.

**1. Ocena aktualności podjętej tematyki i założonego celu rozprawy**

Tematyka związana z projektowaniem, wytwarzaniem i eksploatacją wolnoobrotowych pompy tłokowych o zmiennej wydajności jest aktualna i nadal rozwijana w dziedzinie inżynierii mechanicznej i hydraulicznej. Pompy tłokowe są powszechnie stosowane w różnych zastosowaniach przemysłowych, w tym w przemyśle petrochemicznym, w energetyce, przemyśle chemicznym, czy też w przemyśle spożywczym.

Istnieje wiele czynników, które w sposób istotny wpływają na rozwój tej technologii. Analizując ten aspekt należy zwrócić uwagę na następujące:

- efektywność energetyczna - stały nacisk na efektywność energetyczną skłania producentów pomp do tworzenia nowych rozwiązań, które zapewniają lepszą wydajność przy niższym zużyciu energii. Pompy o zmiennej wydajności mogą być projektowane tak, aby dostosowywać swoją pracę do zmieniających się warunków pracy, co może przyczynić się do oszczędności energii;
- zrównoważony rozwój - w kontekście globalnych wyzwań związanych ze zmianami klimatycznymi i ochroną środowiska, rozwój pomp o zmiennej wydajności może być postrzegany jako krok w kierunku bardziej zrównoważonej produkcji i lepszego – optymalnego wykorzystania energii;
- automatyzacja i sterowanie – dynamiczny postęp w dziedzinie automatyki i sterowania umożliwia bardziej zaawansowane systemy kontroli i sterowania pomp, co pozwala

na optymalizację ich pracy w czasie rzeczywistym, w zależności od zmiennych potrzeb – zmiennego obciążenia;

- innowacje materiałowe - rozwój nowych materiałów, takich jak wysokowytrzymałe tworzywa sztuczne czy kompozyty, umożliwią projektowanie bardziej wytrzymałych, lekkich i trwałych pomp, co może mieć wpływ na ich wydajność i trwałość;
- badania i rozwój - wciąż prowadzone są badania nad nowymi technologiami i metodami produkcji pomp, które mogą poprawić ich wydajność, niezawodność i trwałość.

Wraz z postępem technologicznym i dynamicznymi zmianami w przemyśle, tematyka związana z projektowaniem i budową pomp tłokowych o zmiennej wydajności będzie nadal aktualna i stanowić będzie obszar intensywnych badań i rozwoju.

Biorąc powyższe pod uwagę, wybrany temat pracy doktorskiej uważam za aktualny zarówno pod względem naukowym, jak również pod względem zastosowania wyników badań w praktyce, w przemyśle. Tematyka pracy pt.: „*Wolnoobrotowa promieniowa pompa tłokowa o zmiennej wydajności właściwej – budowa i badania*” mieści się w zakresie dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna.

## 2. Przegląd treści pracy

Recenzowana praca została napisana na 145 stronach maszynopisu formatu A4; składa się z siedmiu rozdziałów oraz bibliografii, w skład której wchodzi 92 pozycje literatury, w tym dwie współautorskie mgr. inż. Michała Zielinskiego.

W rozdziale pierwszym i drugim zawarto treści nawiązujące do zagadnień związanych z projektowaniem i budową promieniowych pomp wyporowych oraz zastosowaniem tych pomp.

W trzecim rozdziale, autor zapisał cel, który sformułował jako: „...opracowanie modelu teoretycznego i przeprowadzenie badań symulacyjnych, a także zbudowanie prototypu i przeprowadzenie badań doświadczalnych wolnoobrotowej promieniowej pompy tłokowej z nowym, energooszczędnym sposobem sterowania wydajnością właściwą”. W tym samym rozdziale opisano zakres zrealizowanych w pracy zadań. Kontynuując, w rozdziale zawarto opis koncepcji prototypowej pompy o zmiennej wydajności właściwej.

W rozdziale czwartym zapisano zakres prac dotyczący projektowania i modelowania matematycznego wolnoobrotowej promieniowej pompy tłokowej o zmiennej wydajności właściwej. W szczególności opisano budowę pompy, model matematyczny uwzględniający podstawowe zjawiska hydrauliki, wyniki symulacji numerycznych.

Rozdział piąty poświęcony jest budowie prototypu pompy tłokowej oraz budowie stanowiska badawczego wraz z torem pomiarowym. W tym rozdziale zawarto również opis podstawowych parametrów i wielkości, które identyfikowano podczas doświadczalnych badań weryfikacyjnych.

Na koniec dysertacji, w rozdziale szóstym zawarto opis etapów badań eksperymentalnych prototypowej pompy tłokowej o zmiennej wydajności.

W rozdziale opisano badania identyfikacyjne wpływu parametrów funkcjonalnych na charakterystyki pracy prototypu.

W ostatnim rozdziale zawarto wnioski końcowe i określono kierunki dalszy prac.

Spis literatury uwzględnia szereg prac z zakresu omawianej tematyki badawczej, w tym wiele prac o podstawowym znaczeniu dla rozważanego problemu, zawiera również wiele dokumentów normatywnych dotyczących poruszanej tematyki.

### 3. Ocena merytoryczna, wyniki pracy i ich ocena

Recenzowana dysertacja autorstwa mgr. inż. Michała Zielinskiego jest opracowaniem, które skupia się na projektowaniu wybranej klasy promieniowej pompy tłokowej o zmiennej wydajności. Autor wykazał się odpowiednią wiedzą z zakresu inżynierii mechanicznej w połączeniu z zagadnieniami identyfikacji doświadczalnej oraz analizy wyników badań.

Podjęte przez autora wyzwanie zaprojektowania promieniowej pompy tłokowej o zmiennej wydajności wg zgłoszenia patentowego wskazanego w literaturze pod pozycją [5] oraz wykonania prototypu wymagało sprostaniu wielu przeciwnościom oraz nowoczesnego podejście do zagadnienia.

Modelowanie wolnoobrotowej promieniowej pompy tłokowej o zmiennej wydajności jest złożonym procesem, który wymaga połączenia wiedzy z różnych dziedzin, takich jak inżynieria mechaniczna, hydraulika, dynamika płynów, automatyka, oraz modelowanie komputerowe. Pełny proces modelowania zawiera kroki, które powinny być uwzględnione w procesie modelowania takiej pompy:

- projektowanie geometrii pompy: na początku należy zaprojektować geometrię pompy, w tym cylindry, tłoki, korpus, zawory, kanały przepływu itp. Wybór odpowiednich wymiarów i kształtów ma kluczowe znaczenie dla wydajności i stabilności pracy pompy;
- modelowanie zjawisk „hydrauliki”: następnie na teoretycznej podbudowie (mechanice płynów) należy przeprowadzić modelowanie zjawisk hydrauliki wewnątrz pompy, aby zrozumieć, jak płyny będą przepływać przez różne części pompy w różnych warunkach pracy. Może to obejmować analizę przepływu laminarnego lub turbulentnego, strat ciśnienia, oraz efekty związane np. z kawitacją i inne;
- modelowanie zjawisk mechanicznych: modelowanie mechaniczne pompy obejmuje analizę naprężeń, odkształceń i drgań w strukturze pompy podczas pracy. To ważne, aby upewnić się, że konstrukcja pompy jest wystarczająco wytrzymała i stabilna, aby zapewnić długotrwałą i niezawodną eksploatację;
- analiza wydajności: wykorzystując wyniki modelowania hydrauliki i mechanicznego, można przeprowadzić analizę wydajności pompy w różnych warunkach pracy, uwzględniając zmienne obciążenia, prędkości obrotowej, oraz inne czynniki wpływające na wydajność;
- optymalizacja: na podstawie wyników analizy wydajności można przystąpić do optymalizacji geometrii i parametrów pracy pompy w celu maksymalizacji

jej wydajności przy minimalnym zużyciu energii lub minimalizacji kawitacji i innych niepożądanych efektów;

- symulacje numeryczne zjawisk dynamicznych: modelowanie komputerowe, takie jak metoda elementów skończonych (MES) lub obliczenia przepływu płynu (CFD), może być użyte do symulowania zachowania się pompy w różnych warunkach pracy i oceny wpływu różnych czynników na jej wydajność i stabilność;
- weryfikacja eksperymentalna: na koniec, istotne jest przeprowadzenie weryfikacji eksperymentalnej, aby potwierdzić poprawność modelu oraz dostosować parametry modelu do rzeczywistych warunków pracy pompy.

**Opisany w niniejszej dysertacji proces projektowania, modelowania matematycznego i weryfikacji eksperymentalnej wolnoobrotowej pompy tłokowej o zmiennej wydajności jest procesem, w którym autor wykorzystał wiele zaawansowanych narzędzi i rozległą wiedzę, i pomimo niedoskonałości w zrealizowanych zakresach (wskazanych powyżej) badań i analiz wynikających m.in. z przyjętych założeń początkowych prowadzi do lepszego zrozumienia zachowania się wybranej klasy wolnoobrotowych promieniowych pomp tłokowych o zmiennej wydajności a w konsekwencji, w przyszłości do ich optymalnego rozwiązania konstrukcyjnego!**

Przedstawiony w pracy problem badawczy jest interesujący poznawczo i ważny ze względu na zastosowanie praktyczne. Wszystkie wymienione powyżej zagadnienia i związane z nimi elementy pracy stanowią o jej wartości merytorycznej.

Lektura dysertacji nasuwa jednak pewne komentarze i uwagi krytyczne, częściowo dyskusyjne:

1. Na stronie 7 Autor podaje „Elementem służącym do zmiany jej wydajności właściwej jest nowatorski mechanizm zmiany mimośrodów”. Kto jest twórcą nowatorskiego mechanizmu?
2. Na stronie 12 Autor pisze „Odbywa się to przez zmianę wartości mimośrodu wału napędowego”. Może to być mylnie odczytane, poza tym mechanizm napędzający tłoki to zmodyfikowany mechanizm korbowy a nie mechanizm mimośrodowy.
3. Na stronie 17 rys. 3 ma nieprawidłową jednostkę natężenia przepływu. Z przepływu 1 dm<sup>3</sup>/min wody przy spadku 1 m otrzyma się moc ułamka wata a nie ok. 5 kW.
4. Na stronie 24 Autor pisze „Współczynnik nastawy to wielkość bezwymiarowa i dla pomp o zmiennej wydajności właściwej przyjmuje wartości od 0 do 1”. W przypadku pomp o zmiennej wydajności i dwóch kierunkach tłoczenia należy przyjmować przedział od - 1 do 1.
5. Odnośnie zależności (1) str. 25 – chyba wygodniej posługiwać się wydajnością jednostkową bez rozróżniania na teoretyczną i rzeczywistą oraz sprawnością objętościową.
6. Na stronie 25 Autor pisze „Moc dostarczona do pompy to moc mechaniczna napędu równa iloczynowi momentu obrotowego i prędkości obrotowej” mając na myśli prędkość kątową (zależność 4 powinna być skorygowana).

7. Na stronie 35 Autor zreferował sposób działania pompy wielotłoczkowej typu Digital Displacement® Pump pisząc „Dzięki zastosowaniu układu sterowania, który nie jest zależny bezpośrednio od położenia kąтового wału napędowego lub, tak jak rozrząd zaworowy, od ciśnienia w komorze wyporowej, uzyskuje się szeroki zakres możliwości sterowania pompą. Pompa, w skrajnych przypadkach, może pracować z maksymalną wydajnością, gdy wszystkie komory połączone są z obwodem tłocznym (rysunek 14d) lub z zerową wydajnością, gdy wszystkie komory połączone są z obwodem ssawnym (rysunek 14c). Regulacja wydajności właściwej odbywa się przez sterowanie zaworami elektrohydraulicznymi. Część z komór wyporowych może być połączona z obwodem ssawnym przez cały lub część skoku tłoczka. Dzięki temu jednostki pompy mogą tłoczyć olej do obwodu tłocznego tylko przez część fazy tłoczenia [65–67].”. Należy zauważyć, że zmodyfikowano tylko sterowanie ssaniem pompy, sterowanie tłoczeniem w dalszym ciągu zrealizowano klasycznie – od zaworów zwrotnych. Natomiast z maksymalną wydajnością pompa będzie pracowała wtedy, gdy rozdzielacze zaworowe nie będą przesterowane sygnałem elektrycznym. Notabene, na rys. 14 symbole rozdzielaczy zaworowych powinny być poprawione – brak wyszczególnienia położenia neutralnego np. od sprężyny powrotnej.
8. Schemat blokowy pokazany na rys. 17, str. 39 wymaga większego zastanowienia. Należy odpowiedzieć sobie na pytanie „W jakim celu w układzie napędowym zastosowano pompę o zmiennej wydajności?” Oczywista odpowiedź to: „Ponieważ w ten sposób można zadawać prędkość obrotową wału silnika hydraulicznego i generatora prądu w warunkach zmiennej prędkości obrotowej koła wodnego napędzającego pompę o zmiennej wydajności”. Należałoby jednak rozpatrzyć to, że zaproponowane rozwiązanie jest de facto przekładnią hydrostatyczną z limitem momentu obrotowego na wale wyjściowym i skonfrontować to z charakterystyką mechaniczną przyjętego generatora prądu. Reasumując należy przyjąć funkcję celu jaki ma osiągać sterownik nastawy wydajności pompy.
9. Na stronie 43 Autor zawarł stwierdzenie „Wydajność pompy jest sumą wydajności wszystkich jej komór wyporowych. Pompa będąca tematem tej rozprawy posiada trzy zespoły ssąco-tłoczące. To powoduje nakładanie się na siebie punktów zmiany faz pracy komór pojedynczego zespołu. Wiąże się to ze wzrostem nierównomierności wydajności pompy”. Sporządzenie prostego modelu teoretycznej chwilowej wydajności pompy z cylinderkami podwójnego działania i napędem mimośrodowym takim, by skoki wszystkich tłoczków były równe, pokazuje, że to twierdzenie nie jest prawdziwe.
10. Wyznaczanie strat ciśnienia w warunkach przepływu pulsacyjnego jest zagadnieniem złożonym (np. Z. Kudźma : Tłumienie pulsacji ciśnienia i hałasu w układach hydraulicznych w stanach przejściowych i ustalonych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012). Wyniki obliczeń miejscowych strat ciśnienia wg zależności (39) ze strony 49 również mogą odbiegać od wartości rzeczywistych.
11. Jaki czas tn miał Autor na myśli w odniesieniu do zależności (42)?

12. Przebiegi pokazane rys. 23 potwierdzają podejrzenie nierównych skoków tłoków w poszczególnych cylindrach pompy, co jest oczywiście konsekwencją ich napędu od przyjętego mechanizmu przegubowego. **Stąd jedna z możliwych tez rozprawy doktorskiej mogła brzmieć: „Istnieje takie rozwiązanie mechanizmu przegubowego napędu tłoków o nastawnym skoku, dla którego nierównomierność wydajności pompy jest nie większa jak dla napędu mimośrodowego”.**
13. Rys. 28 na stronie 63 można było ograniczyć do jednego przebiegu.
14. Badania eksperymentalne, których wyniki przedstawiono w rozdziale 6 (str. 80 – 127), można było oprzeć na gotowym planie eksperymentu całkowitego lub ułamkowego i tym samym ograniczyć poniesiony nakład sił i środków. Przykładowo, czym jest podyktowana realizacja badań, których wyniki pokazano na rys. 60, str. 102, dla zakresu prędkości obrotowej od 8 obr/min do 22 obr/min co 1 obr/min?
15. Przypuszczenia Autora, zawarte w podrozdziałach 6.5.5 i 6.5.6, można było potwierdzić budując model dynamiczny układu z przedstawioną pompą zamiast porównywać wyniki badań eksperymentalnych do, de facto, modelu statycznego.

Rozważania teoretyczne oraz zaproponowana metodyka projektowania jest pomimo powyższych uwag osiągnięciem naukowym autora. Tematyka recenzowanej dysertacji mieści się w nurcie prac o znaczeniu zarówno teoretycznym jak i praktycznym, dotyczy bowiem istotnych zagadnień z punktu widzenia optymalizacji konstrukcji oraz eksploatacji wybranej klasy promieniowych pomp tłokowych o zmiennej wydajności.

Rozprawa jest poprawnie skonstruowana i logicznie uporządkowana. Niemniej autor prezentuje tylko poprawny przegląd literatury nie uwzględniając kilku aspektów, przede wszystkim aspektów związanych ze zjawiskami dynamicznymi.

Zastosowane techniki identyfikacji i analizy eksperymentalnej świadczą o rzetelnym podejściu do uzyskania wiarygodnych i precyzyjnych wyników. Wyniki te są klarownie przedstawione.

#### 4. Ocena końcowa

Oceniając przedstawioną rozprawę doktorską należy podkreślić aktualność jej tematyki z punktu widzenia projektowania, produkcji i eksploatacji wybranej klasy wolnoobrotowych promieniowych pomp tłokowych o zmiennej wydajności.

W mojej opinii podstawowym problemem przedstawionego w niniejszej dysertacji rozwiązania konstrukcyjnego wolnoobrotowej promieniowej pompy tłokowej o zmiennej wydajności, który ujawni się na etapie jego wdrażania, może być duża nierównomierność chwilowej wydajności pompy. Autor we wnioskach, w punkcie V. wspomina o tej przypadłości prototypu.

Bez badań modelowych, opartych na modelu który jednocześnie opisuje własności dynamiczne koła wodnego przedstawionej pompy i przyjętego generatora prądu trudno

jednoznacznie odpowiedzieć, czy takie rozwiązanie sprawdzi się w praktyce. Wniosek zawarty w pkt. IX. należy doszczegółowić o moją uwagę.

Recenzowana rozprawa zawiera takie elementy jak: projektowanie, modelowanie, identyfikacja doświadczalna parametrów funkcjonalnych oraz wnioskowanie, które można uznać za oryginalny wkład w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna.

Warto również zauważyć, że rozprawa ma bezpośrednie odniesienie do praktycznych implikacji uzyskanych wyników.

Mimo przedstawionych uwag krytycznych, realizację postawionego zadania można ocenić pozytywnie ze względu na:

- poprawne zdefiniowanie problemu badawczego i w większości jego rozwiązanie,
- poprawny sposób prezentacji wyników i ich analizy,
- wymierne osiągnięcia teoretyczno-aplikacyjne (wytworzony prototyp, stanowisko badawcze i tor pomiarowy), pozwalające na szereg spostrzeżeń i wyciągnięcie interesujących wniosków w przyszłości, co zresztą w jakimś stopniu zostało zawarte w niniejszej dysertacji.

Recenzowana praca spełnia wymogi odnośnie przewodu doktorskiego, określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku, z późniejszymi zmianami, o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.

Biorąc powyższe pod uwagę, wnioskuję o dopuszczenie doktoranta do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.



