

dr hab. inż. Jerzy Małachowski, prof. nadzw. WAT
Wydział Mechaniczny
Wojskowa Akademia Techniczna
Ul. Gen. Witolda Urbanowicza 2
Tel.: +48 261 839 140
E-mail: jerzy.malachowski@wat.edu.pl

Warszawa, 01.09.2018 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej pt. *Koncepcja silnika turbinowego o zasilaniu pulsacyjnym*
napisanej przez mgra inż. PIOTRA TARNAWSKIEGO

1. Podstawa opracowania

Podstawę opracowania stanowi pismo Prodziekan Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej prof. nzw. dra hab. inż. WITOLDA MAROWSKIEGO, podyktowane decyzją Rady Wydziału z dnia 20.06.2018 i dołączona do niego rozprawa doktorska mgra inż. PIOTRA TARNAWSKIEGO pt. *Koncepcja silnika turbinowego o zasilaniu pulsacyjnym*. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. WIESŁAW OSTAPSKI, a promotorem pomocniczym dr inż. WOJCIECH KAMELA.

2. Omówienie pracy

Recenzowana praca została napisana na 140 stronach maszynopisu formatu A4; składa się z 5 rozdziałów, wykazu literatury i dwóch załączników. Rozprawa w całości napisana jest w języku polskim. Spis literatury zawiera 61 pozycji. Tytuły poszczególnych rozdziałów są następujące: (1) Wstęp; (2) Analityczne oszacowanie sprawności energetycznej silnika według obiegu Humphreya; (3) Numeryczna 3-wymiarowa analiza CFD sprawności energetycznej silnika turbinowego o zasilaniu pulsacyjnym dla różnych koncepcji rozrządu; (4) Udoskonalenie podejścia symulacyjnego oraz optymalizacja koncepcji silnika turbinowego o zasilaniu pulsacyjnym z zastosowaniem wirującego rozrządu ze względu na jego sprawności energetyczną; (5) Zakończenie.

Zakres pracy doktorskiej obejmuje analityczno-numeryczne studium silnika turbinowego o zasilaniu pulsacyjnym z zastosowaniem wirującego rozrządu. Jak wskazuje Autor, silnik wyróżnia się dużą sprawnością energetyczną i małym jednostkowym zużyciem paliwa. Ze względu na jego dobre parametry, jak również prostą konstrukcję, prezentowana

koncepcja silnika może stanowić konkurencję dla obecnych na rynku silników turbowałowych.

Doktorant wskazuje także, że „cechą charakterystyczną, a zarazem głównym założeniem prezentowanej koncepcji silnika, jest izochoryczny proces spalania, przebiegający w stacjonarnych komorach spalania. Silnik pracuje zgodnie z obiegiem termodynamicznym Humphreya, który ma wyższą sprawność energetyczną niż obieg Brytona-Joule’a, według którego pracują klasyczne silniki turbinowe. Praca badanej koncepcji silnika wymaga następujących po sobie etapów: przygotowania wysokociśnieniowych gazów i zasilania turbiny tymi gazami. Silnik zasilany jest więc pulsacyjnie, inaczej niż klasyczne silniki turbinowe, które zasilane są w sposób ciągły. Realizacja zasilania pulsacyjnego wymaga zastosowania układu rozrządu. Stanowi on istotny komponent prezentowanej koncepcji silnika, i w decydującym stopniu wpływa na jego efektywną pracę”.

Autor zawarł w pracy także wybrane przykłady koncepcji silników turbinowych o izochorycznym spalaniu wskazując jednocześnie na ich ograniczenia wskazane na podstawie przeprowadzonego studium literaturowym.

Podstawowym narzędziem badawczym wykorzystywanym w pracy Doktoranta była analiza numeryczna oparta o komputerową mechanikę płynów (ang. *CFD, Computational Fluid Dynamics*). Wykonane analizy dotyczyły przepływu gazów w układzie ruchomych zaworów, proces spalania, rozprężanie gazów i generowanie momentu w turbinie. Doktorant poddał badaniu pracę silnika z zastosowaniem rozrządu z różnymi zaworami (krążkowymi, tarczowymi, klapkowymi), oraz z różnym sposobem zasilania (zasilanie na całym obwodzie turbiny, zastosowanie dysz 2-ciśnieniowych). W wyniku przeprowadzonych licznych analiz szeregu pośrednich konstrukcji rozrządu, doprowadził do opracowania nowatorskiej koncepcji wirującego rozrządu, dzięki któremu, jak wskazał w oparciu o otrzymane wyniki, została zapewniona duża sprawność energetyczna. Należy potwierdzić, iż przedstawiona idea wirującego rozrządu stanowi oryginalne i najważniejsze osiągnięcie niniejszej pracy. Takie rozwiązanie zapewnia efektywny przepływ spalin i rozprężanie gazów w dyszach o różnych stosunkach pola przekroju maksymalnego do pola przekroju minimalnego, optymalne kąty natarcia spalin na łopatki turbiny oraz zasilanie spalinami na całym obwodzie turbiny. Konstrukcja rozrządu przedstawiona w rozprawie stanowi jednoelementowy i samonapędzający się obiekt, którego ruch wywołany jest poprzez siłę odrzutu spalin generowaną w dyszach.

Doktorant w wyniku przeprowadzonych analiz numerycznych wykazał, że do osiągniętej dużej sprawności energetycznej silnika turbinowego o zasilaniu pulsacyjnym, przyczyniło się zastosowanie wielostopniowego sprężania z wykorzystaniem turbosprężarek.

Zasilane były one spalinami wylotowymi z turbiny oraz spalinami reszkowymi z komór spalania.

Wyniki swoich badań Autor zawarł także częściowo w swoich publikacjach, do których należy jedna publikacja z listy JCR i jedna z listy B MNiSW. Trudno uznać do dorobku Doktoranta trzecią publikację, przy której jak sam wskazuje widnieje zapis " (Artykuł po wstępnej akceptacji i w trakcie drugiej recenzji)". Jest to dorobek spełniający stawiane wymagania w przypadku realizacji prac doktorskich.

3. Uwagi krytyczne, pytania merytoryczne oraz dyskusyjne

Po zapoznaniu się z treścią całej rozprawy, Recenzent chciałby otrzymać odpowiedzi na następujące kwestie oraz wyraża swoje następujące wątpliwości:

- 1) Recenzent wyraża swoją wątpliwość, czy użycie w tytule pracy doktorskiej słowa „koncepcja” jest poprawne (spływająca zawarte treści i analizy) i czy nie bardziej trafnym byłoby użycie sformułowania „studium analityczno-numeryczne ...”? Przedstawiona do recenzji rozprawa jest właśnie formą studium wykonanego z wykorzystaniem metod analitycznych i numerycznych dla szeregu zaproponowanych rozwiązań konstrukcyjnego badanego w pracy silnika turbinowego o zasilaniu pulsacyjnym.
- 2) Autor przedstawiając wyliczenia analityczne sprawności energetycznej proponowanych nowych wariantów silnika za każdym razem przedstawia jak zmienia się ta wartość nie definiując tej zmiany w ujęciu procentowy. Z punktu widzenia czytelnika byłoby to bardziej zrozumiałe i jasno wskazywało jak dany parametr rzutuje na sprawność w stosunku do wyliczonej wartości bazowej.
- 3) Wykonując obliczenia analityczne w punkcie 2.5 Doktorant w sposób arbitralny przyjmuje wartość kroku czasowego nie definiując jednak czym ta wielkość jest uwarunkowana i w oparciu o jakie kryterium jest wyliczana.
- 4) Doktorant w wielu punktach pracy przedstawia wykorzystanie pewnych opcji użytego programu i stowarzyszonych z nimi angielskich nazw (np. *Species Transport*, *interface*, *Second Order Upwind*, *itp.*) nie tłumacząc w żaden sposób ich znaczenia fizycznego lub matematycznego z punktu widzenia realizowanych symulacji numerycznych. Autor potwierdza tym faktem bardzo dobrą znajomość środowiska obliczeniowego, jednak brak wyjaśnień i interpretacji użytych opcji budzi wątpliwość Recenzenta co do strony merytorycznej umiejętności

stwierdzenia poprawności ich użycia. Z punktu widzenia czytelnika rozprawy celowym byłoby np. umieszczenie takich wyjaśnień w jednym z załączników.

- 5) Realizując tak zaawansowane obliczenia numeryczne Doktorant nie pokusił się na żadnym etapie ich wykonywania na tzw. studium wrażliwości, czy to użytych warunków początkowo-brzegowych, czy też samej siatki elementów dyskretnych i jej wpływu na otrzymywane rezultaty. Wymaganą wielkość modelu w zależności (szacunkowa liczba węzłów siatki obliczeniowej) niezbędna do uzyskania wiarygodnego rozwiązania, czy to dla zagadnień związanych z modelowaniem metoda bezpośredniej symulacji obliczeniowej przepływów turbulentnych (DNS) lub metodą symulacji dużych wirów turbulentnych (LES), jest możliwa do oszacowania w oparciu o znane wzory analityczne, gdzie bazowym parametrem jest liczba Reynolds. Niestety takich analiz Autor nie przedstawił. Szczególnie bardzo ważnym aspektem w modelowaniu CFD jest wielkość strefy przyściennej, która tutaj nie jest także przez Doktoranta analizowana. Takie szacunki można przecież przeprowadzić także dla najprostszych geometrii, w których realizowanych jest numeryczny opis zagadnienia symulacji przepływu gazu/cieczy i dla którego znane są wyniki otrzymywane w oparciu o istniejące rozwiązania analityczne. Taka forma walidacji z pewnością mocno uwiarygodniłaby przyjęte założenia dla rozwijanych modeli numerycznych. Nie załączone są też analizy co do użytego modelu turbulencji, których w użytkowanym przez Doktoranta oprogramowaniu jest min. ok. 6 w zależności od wersji oprogramowania. Jak wiadomo jest to jeden z kluczowych parametrów w momencie analizy zagadnień opisujących przepływy turbulентne. Na potwierdzenie tego faktu, sam Autor w jednym ze zdań (str. 95) stwierdza m. in. „Warto zauważyć, że zmiana ustawień solvera, zmiana paliwa oraz uwzględnienie chłodzenia komór doprowadziły się do spadku sprawności energetycznej...”.
- 6) W punkcie 3.2.5 Autor przedstawia pewne założenia dotyczące wymiarów dyszy, jednak w żaden sposób nie są one potwierdzone wynikami wstępnych założeń i analiz teoretycznych lub też nie ma wyjaśnień natury technologicznej.
- 7) Autor w jednym modelu używa różnych rodzajów elementów skończonych/objętości skończonych (np. czworościennych i sześciościennych), co jak wiadomo jest jednym ze źródeł potencjalnych błędów wpływającym na jakość otrzymywanych wyników. Brak jest także analiz o charakterze wrażliwości modelu na tego typu rozwiązania z uwagi na symulację procesów silnie nieliniowych.

- 8) Doktorant w dwóch podrozdziałach podejmuje zagadnienie, które określa mianem „optymalizacji” (np. „Optymalizacja kątów natarcia spalin i profilu łopatkı turbiny” lub „Optymalizacja współczynnika nadmiaru powietrza i sprężu”). Należy jednak domniemywać, iż na podstawie zawartej treści i opisu trudno jest mówić o zagadnieniu optymalizacji, a przedstawione wyniki są bliższe zagadnieniu na kształt próby wrażliwości modelu na zmianę pewnych wymiarów geometrycznych. Trudno jest mówić o optymalizacji, gdy jasno nie definiuje się użytej funkcji celu, przyjętych warunków (ograniczeń, które należy spełnić) oraz użytych metod optymalizacji nie wspominając już o fakcie, czy podjęte zagadnienie ma charakter jedno- czy wielokryterialny.
- 9) Recenzent nie rozumie faktu drukowania zaproponowanego modelu demonstracyjnego silnika z wirującym rozrządem i 3-ciśnieniowymi dyszami w technologii 3D, który jednak przeprowadza się w skali 1:4 i nie poddaje się dalej żadnym analizom eksperymentalnym. Należy także uwzględnić, iż tego typu zagadnień nie poddaje się skalowaniu z uwagi na dynamikę odzwierciedlanych procesów, ich silną nieliniowość oraz fakt, iż ten rodzaj drukowanych elementów i użytego materiału jest silnie czuły na występujące w symulowanym procesie zagadnienia termodynamiczne. Tym bardziej budzi to niezrozumienie.
- 10) W całym tekście rozprawy doktorskiej część wyników jest przedstawiana w postaci przebiegów czasowych, jednak brak jest wytłumaczenia dlaczego tylko część na osi czasu prezentuje się od chwili 0,0 s, a inne prezentowane są od pewnej wartości. Brak jest też pod tymi wykresami (szczególnie dotyczy to przebiegów ciśnień i generowanych momentów) analiz nadających wytłumaczenie dla nagłych skokowych zmian prezentowanych wyników w odniesieniu do zachodzących/symulowanych procesów/zjawisk.

W pracy zauważalne są też pewne błędy natury redakcyjnej (edytorskiej), do których można zaliczyć m. in.:

- 1) zapis edytorski wzorów i ich opis (np. w rozdziale 3.1),
- 2) część wykresów w stosunku do zawartych w tekście opisów posiada inny system jednostek (np. raz Autor używa Pa, a raz MPa lub W albo kW).

4. Ocena końcowa przedłożonej rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska charakteryzuje się niewątpliwie walorem aplikacyjnym i wskazuje na uzasadnioną potrzebę badań w przedmiotowym

zagadnieniu. Ten fakt jest także potwierdzony przez Doktoranta w wynikach przeprowadzonego studium literaturowego. Omawiana rozprawa posiada także wartość poznawczą, identyfikacyjną i stanowić może ciekawy wkład do poszukiwania nowych rozwiązań silników turbinowych o zasilaniu pulsacyjnym.

Na wartość naukową rozprawy niewątpliwie składają się w opinii Recenzenta następujące elementy autorskie (oryginalne):

- 1) przedstawiona idea nowego rozwiązania konstrukcyjnego silnika turbinowego z wirującym systemem rozrządu, która powstała na bazie szeregu przeprowadzonych analizy,
- 2) wielowariantowe studium analityczno-numeryczne wykonane z wykorzystaniem najnowszych narzędzi komputerowych używanych w komputerowej mechanice płynów.

Równocześnie Recenzent pragnie zauważyć, że mimo licznych uwag i propozycji korekt (uzupełnień), Doktorant podjął się bardzo ważkiego i trudnego problemu, który nie zawsze daje możliwość walidacji eksperymentalnej. Stąd też należy pamiętać, by na każdym etapie badań (podstawowym i etapowym) dokonywać takich porównań np. nawet z wykorzystaniem sprawdzonych zamkniętych rozwiązań/modeli analitycznych, gdyż dzięki temu możliwe jest podniesienie wiarygodności otrzymanych wyników końcowych.

Recenzent chciałby podkreślić, iż podjęty przez Doktoranta cel został osiągnięty, a wskazane uwagi mają za zadanie wytyczyć kierunki rozwijania kolejnych etapów badawczych w dochodzeniu do otrzymania w pełni wiarygodnego i sprawdzonego w warunkach laboratoryjnych zaproponowanego rozwiązania konstrukcyjnego. Recenzent ma także nadzieje, iż wskazane uwagi będą stanowić inspirację do wyznaczenia coraz to bardziej ambitnych celów naukowych.

5. Wniosek końcowy

Recenzent stwierdza, że przedstawiona dysertacja doktorska spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez ustawę „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z dnia 14 marca 2003 roku, z późn. zm.) i stawia wniosek o dopuszczenie do publicznej obrony rozprawy doktorskiej mgr inż. PIOTRA TARNAWSKIEGO.

