

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Wiśłocki

POLITECHNIKA POZNAŃSKA
Instytut Silników Spalinowych i Napędów
60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3
Tel.: +48 61 665-2207, fax: +48 61 665-2204
Tel.: 601 74-70-20

Poznań, 2.09.2024 r.

OCENA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Dariusza Kozaka pt.:

Numerical study on exhaust pulse separation problem for multi-cylinder engine

- 1. Podstawa opinii:** pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka prof. dr hab. inż. Tomasza Wiśniewskiego z dn. 23.05.2024 r., sygn. RND.ISGiE.70.2024, które otrzymałem w dniu 3.06.2024 r.
- 2. Podstawa prawna:** Ustawa: *Prawo o Szkolnictwie Wyższym* z dnia 20 lipca 2018 r., (Dz. U. Poz. 1668), tekst jednolity opublikowany w Obwieszczeniu Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 3 marca 2022 r. (Dz.U. 2022 poz. 574) i Dz.U.2023.742 oraz zmian z dnia 13 stycznia 2023 r. (Dz.U.2023.212), wchodzących w życie z dniem 1 maja 2023 r., szczególnie Dział V *Stopnie i tytuł w systemie szkolnictwa wyższego i nauki*, Rozdz. 2, *Nadawanie stopnia doktora*, Art. 187; dalej nazywana *Ustawą*.
- 3. Przedmiot opinii:** przedłożona do zaopiniowania rozprawa doktorska mgr. inż. Dariusza Kozaka została wydana w Politechnice Warszawskiej jako druk zwarty w formacie A5 (WUT, 2024), w oprawie broszurowej. Zawiera ona 159 strony druku, w tym 148 stron zasadniczego tekstu (podzielonego na 9 rozdziałów), spis treści, streszczenie w języku polskim i angielskim, wykaz symboli, skrótów, oznaczeń (*Nomenclature*), 1 stronę spisu tabel, 6 stron spisu rysunków oraz 10,5 stron spisu literatury. W pracy umieszczono 114 rysunków, 22 tablice oraz 42 ponumerowane wzory. Bibliografia (*References*) obejmuje 106 pozycji, głównie (96%) publikacje zagraniczne, z okresu ostatnich kilkunastu lat. Praca jest napisana w języku angielskim. Do rozprawy dołączono Część 2 (Part 2) zawierającą 7 abstraktów powiązanych tematycznie i opublikowanych wcześniej artykułów autora, stanowiących przedmiot rozdziału 7 rozprawy (rozdz. 7.1 – 7.7).

Uważam, że przedłożona praca jest zgodna z wymaganiami Art. 187 pkt. 3 i 4 *Ustawy*.

4. Struktura pracy i ocena jej poprawności metodologicznej

Przedłożona rozprawa została podzielona na 9 rozdziałów. Rozdział 1. stanowi (niezbyt udane, por. s. 2 tej recenzji) wprowadzenie do problematyki poruszanej w pracy, rozdział 2. zawiera sformułowanie problemu badawczego oraz analizę stanu wiedzy w zakresie doładowania pulsacyjnego, zaś rozdział 3. przedstawia szczegółowe zagadnienia badawcze oraz zakres pracy. W rozdziale 4. Autor przedstawił zagadnienia dotyczące istoty turbodoładowania, w rozdziale 5. przedstawił analizę stanu wiedzy w zakresie objętym tematem rozprawy, a w rozdziale

6. omówił budowę stanowiska pomiarowego i jego wyposażenia. Rozdział 7. został przeznaczony na omówienie siedmiu kolejnych publikacji stanowiących badawczą podstawę tej dysertacji, które następnie podsumował i sformułował wnioski w rozdziale 8. Wnioski prognozytyczne ze swoich badań Autor zawarł w rozdziale 9. Zasadniczą treść rozprawy kończą: spis wykorzystanej literatury oraz – wspomniane już wcześniej – przytoczenie streszczeń (*abstracts*) wykorzystanych autorskich artykułów.

Pierwszy rozdział pracy (*Introduction*) zajmuje aż 9 stron i zawiera 6 rysunków; Autor wskazuje w tym rozdziale, że redukcja emisji stanowi obecnie największy problem w rozwoju transportu ze względu na jego znaczący udział w tworzeniu efektu cieplarnianego (s. 27). Aż 7 stron tego rozdziału Autor poświęcił problemom emisji związków toksycznych (s. 27-34), uwzględniając zagadnienia dotyczące pojazdów elektrycznych (s. 30-31) i różnych paliw alternatywnych (CNG, LPG, H₂ alkohole; s. 33). Problemy te oczywiście są ważne, ale nie został wskazany ich jakiś związek z tytułem pracy dotyczącym *numerical studies* i *exhaust pulse separation*. Dopiero na końcowej stronie pojawia się zagadnienie doładowania silników wielocylindrowych (s. 35), ale ciągłość narracji tego fragmentu jest dość dyskusyjna.

Ostatecznie silnie zmieniona została rola rozdziału wprowadzającego do pracy na rozdział poświęcony pewnym ograniczonym studiom literatury na zagadnienia dość luźno związane z głównym tematem pracy. W rezultacie na początku rozdziału 2 pojawia się dość zaskakująco pojęcie doładowania pulsacyjnego (*pulse turbocharging*), które nie wystąpiło w analizie stanu wiedzy.

Warto może tutaj zwrócić uwagę, że prawidłowe rozwiązanie oryginalnego, naukowego problemu badawczego powinno zawierać:

1. Wprowadzenie do problematyki pracy ze wskazaniem motywacji i celowości podjęcia określonej tematyki badawczej,
2. Ocenę bieżącego stanu wiedzy przeprowadzoną w oparciu o dostępne źródła wiedzy w celu zdefiniowania braków i niedostatków tej wiedzy,
3. Sformułowanie naukowego problemu badawczego (ewentualnie także tez lub hipotez) oraz wynikających z niego koniecznych do rozwiązania zadań szczegółowych, a także kryteriów uznania problemu za rozwiązany,
4. Przyjęcie sprecyzowanej metody badawczej i metodyki jej stosowania,
5. Zdefiniowanie obiektu (-ów) badań, aparatu badawczego oraz metod i sposobów analizy wyników,
6. Ilościową i jakościową ocenę uzyskanych wyników,
7. Interpretację wyników i sformułowanie wniosków końcowych.

Autor zastosował w swojej pracy nieco zmienioną strukturę, co nieco zaburza i utrudnia właściwy odbiór pracy. Niestety, naukowe prace promocyjne tworzone w oparciu o zbiór artykułów i publikacji bardzo utrudniają utrzymanie logicznej i spójnej narracji oraz przejrzystej struktury rozwiązywania problemów naukowych. Ale wszystkie wskazane wyżej 7 elementów w opiniowanej dysertacji występują, choć nie zawsze wyraźnie wyodrębnione.

5. Ogólna charakterystyka problematyki poruszanej w rozprawie

5.1. Aktualność podejmowanej problematyki badawczej

Doktorant pan Dariusz Kozak podjął w swojej pracy problematykę symulacyjnych badań pulsacyjnego zasilania turbiny układu doładowania w silniku wielocylindrowym. Zagadnienie to jest wprawdzie nie nowe, znane od czasu zastosowania tzw. doładowania pulsacyjnego, jednak stałe dążenie do zwiększenia sprawności silnika spalinowego i dalszej poprawy jego koncentracji wytwarzanej mocy uzasadnia kontynuowanie prac nad uzyskaniem skuteczniejszego

wykorzystania energii spalin, w tym przypadku energii kinetycznej, przez bardziej efektywną zamianę energii kinetycznej pulsacji na ciśnienie zasilania turbiny.

W rozdziale pierwszym niezbyt fortunnie Autor położył nacisk na omówienie zagadnień dotyczących wpływu problemów emisji związków szkodliwych przez silniki spalania wewnętrznego na kierunki rozwoju układów napędowych środków transportu, gdyż nie te zagadnienia stanowiły istotę rozważań w dalszej części pracy. Autor przy tym nie wykazał przekonująco istotności związku takiej emisji z dalej podejmowaną tematyką badania sposobu zasilania turbiny w układzie turbodoładowania, więc trudno te rozważania uznać za wystarczającą motywację do podjętych badań. Pewną rekompensatę tej niedoskonałości można znaleźć na ostatnich 2 stronach Wprowadzenia (*Introduction*, s. 35-36), gdzie zwrócił uwagę na powiązanie trendu *downsizingu* ze zwiększaniem koncentracji mocy w silnikach spalinowych i ze zmniejszaniem ich emisji jednostkowej. Na s. 35 (w. 4-5) pojawiła się uwaga o możliwości większego wykorzystania energii kinetycznej spalin w układach turbodoładowania. Dalej (w. 10 od dołu i n.) Autor słusznie zwraca uwagę na istotność właściwości aerodynamicznych turbiny i warunków wylotu spalin dla doboru turbosprężarki do silnika, szczególnie w warunkach ciągłych zmian obciążenia silnika (s. 36).

W ostatnich wierszach tego rozdziału Autor stwierdza celowość badań wskaźników pracy turbiny w warunkach pulsacyjnego zasilania turbiny pisząc: "Thus, it is worth investigating the turbocharger turbine performance under pulsatile flow to utilize heat energy in the engine's exhaust manifold efficiently." To stwierdzenie Autor wykorzystał jako ostateczne uzasadnienie do podjęcia eksperymentalnych i numerycznych badań nad problemem rozdziału pulsacji spalin w poszczególnych kanałach wlotowych turbiny („That is why the scope of this thesis covers the exhaust pulse separation problem for two-stroke, multicylinder ICE in the form of experimental and numerical approaches...”). Zabrakło tutaj jednak choćby zdawkowej oceny, jaki potencjał rozwojowy może się wiązać z takimi badaniami i jakie nadzieje Autor z nimi wiąże, sygnalizując formułowane dalej hipotezy badawcze.

5.2. Istotność problematyki badawczej pod względem poznawczym i aplikacyjnym

Zagadnienia zwiększania koncentracji mocy we współczesnych silnikach spalinowych, szczególnie w powiązaniu ze zwiększaniem ich sprawności użytecznej (głównie cieplnej), zmniejszaniem emisji związków toksycznych oraz gazów cieplarnianych stanowią w ostatnich latach ważny kierunek prac badawczych i rozwojowych dotyczących napędów środków transportu. Turbodoładowanie silników jest jedną z najważniejszych metod osiągnięcia takich celów. Świadczy o tym choćby powszechność jego stosowania, gdyż silniki niedoładowane (wolnosące) stanowią już obecnie ledwo ułamek procenta rynku motoryzacyjnego.

Ostatnie kilkanaście lat skutkowało także znaczącym zwiększeniem sprawności silników, szczególnie sprawności cieplnej, wynikającej z istotnej poprawy procesów tworzenia mieszanki palnej, kontroli przebiegu spalania, lepszej izolacji cieplnej obszarów spalania oraz znacznie lepszego wykorzystania energii resztowej, głównie energii cieplnej i kinetycznej spalin.

Pamiętając o tym, że eksploatacja silnika spalinowego odbywa się przy silnie zmiennym obciążeniu, w warunkach nieustalonych, podejmowanie dalszych wysiłków nad lepszym zrozumieniem i efektywnym wykorzystaniem pulsacji ciśnienia i strumienia masy spalin wydaje się bardzo uzasadnione. Wprawdzie trudno oczekiwać uzyskania kilkunastoprocentowej poprawy wskaźników energetycznych, jednak każde kilka procent w skali globalnej może dać znaczące efekty praktyczne, gospodarcze i ekologiczne.

Warto tutaj zauważyć, że właśnie prace ostatnich kilkunastu lat w zakresie warunków zasilania turbiny w układzie doładowania przyniosły znaczącą poprawę jego efektywności i zdolności silnika do dynamicznej zmiany obciążenia (turbiny *Twin-scroll*, VGT, VNT itp.). Podejmowanie prac nad poszukiwaniem możliwości dalszej ich poprawy wydają się zatem uzasadnione.

Współcześnie rozwijane procedury rozwojowe złożonych mechanizmów jakimi są m.in. silniki spalinowe w coraz większym stopniu wykorzystują metody modelowania numerycznego i symulacji procesów fizycznych. Takie symulacyjne metody badawcze mogą znacznie skrócić czas poszukiwania najkorzystniejszych rozwiązań konstrukcyjnych i eksploatacyjnych jednak zawsze wymagają eksperymentalnej identyfikacji i weryfikacji tworzonych modeli, a ostatecznie też eksperymentalnej weryfikacji przewidywanych symulacyjnie rezultatów. Dlatego badania modelowe oparte o wyniki eksperymentów fizycznych jest właściwe, tym bardziej, że często pozwalają one rozpoznać zjawiska i procesy składowe, których nie da się zaobserwować lub zmierzyć w trakcie eksperymentu fizycznego; takie postępowanie także przyjął Autor w swojej pracy.

Podjęcie pracy naukowo-badawczej powinno zmierzać do wykrycia lub deterministycznego opisanie zależności funkcjonalnych związków przyczynowo-skutkowych i prowadzić do wytworzenia narzędzia przewidywania skutków wywołania określonych przyczyn, lub – w sytuacji odwrotnej – dla oczekiwanych skutków zastosowania wymaganych przyczyn. W analizowanej pracy postulat ten sprowadził się do weryfikacji opisu poprawności wyników opisu modelowego w odniesieniu do wyników pomiarów stanowiskowych dla różnych wartości ciśnienia doładowania (rozd. 7.1), wykorzystania turbiny gazowej do odzyskiwania energii cieplnej (rozd. 7.2), niestacjonarnego zasilania turbiny 6-cio wlotowej (rozd. 7.3), turbodoładowania dwustopniowego (rozd. 7.4), doładowania typu VGT (jednostopniowego, rozdz. 7.5), dwustopniowego (rozd. 7.6).

Ostatecznie, w rozdziale 8 podsumowującym osiągnięcia pracy Autor przypomina główny cel pracy jako: "...design and validate the unique and novel model of turbocharging system, which could effectively separate the exhaust pulses from multiple cylinders and efficiently recover the heat energy from exhaust gasses." (s. 145, w. 2-4), co w istocie zostało zrealizowane. Sformułowane na s. 145-147 wnioski mają w części charakter opisowy i nieco ogólnikowy, ale zawierają także konkretne oceny ilościowe.

W związku z przytoczonymi tutaj argumentami podjęcie problematyki poprawy efektywności doładowania pulsacyjnego silników wielocylindrowych wydaje się całkowicie uzasadnione i celowe.

5.3. Sformułowanie problemu, celu pracy i tez badawczych

W tytule rozdziału 2 Autor wskazuje problem badawczy jako doładowanie pulsacyjne, jest to jednak określenie zbyt ogólne, gdyż nie precyzuje o jakie zagadnienie szczegółowe w takim doładowaniu tutaj chodzi. W początkowych zdaniach tekstu pojawia się nieco bardziej sprecyzowane wskazanie na zagadnienia komputerowego modelowania i symulacji, a zastosowanie CFD prowadzi do przyspieszenia postępu w badaniach. W kolejnym akapicie Autor stwierdza, że badania eksperymentalne dotychczas były prowadzone w warunkach ustalonych i niestabilnych, przy różnych, lecz stałych warunkach przepływu spalin. Taka ocena stanu badań wydaje się jednak sformułowana pod wcześniej przyjętą tezę badawczą podejmowanej pracy, gdyż wiele badań nad pulsacyjnym doładowaniem silników spalinowych prowadzono jeszcze w latach 60-tych XX w., co skutkowało opracowaniem i wdrożeniem systemów z wymiennikami impulsów, systemów dwu- i wieloimpulsowych, szczególnie w silnikach wielocylindrowych agregatowych i napędu głównego statków. Informacje na te tematy można znaleźć w monograficznych opracowaniach wielu autorytetów z doładowania, m.in. K. Zinnera, N. Watsona i M. Janoty, J. A. Wajanda, K. Niewiarowskiego, M. Berhardta przytoczone później także przez K. Wisłockiego i J. Mysłowskiego. Niestety analizę stanu wiedzy w tym zakresie Autor przeprowadził dla publikacji począwszy od 2002 r., co stanowi dość ważną wadę metodyczną.

Podjęta przez Autora analiza źródeł została oparta na bogatej literaturze przedmiotu obejmującej 94 pozycje; zaledwie kilka z nich pochodzi sprzed 2000 r. (1996, 1997, 1998), więc

jest to literatura najnowsza. Pewne wątpliwości budzi jednak oparcie się głównie na literaturze zagranicznej, choć prace o podobnej problematyce pojawiały się także w Polsce, co wskazałem wyżej.

Wprawdzie oczekuje się, że w tym rozdziale zostanie wyraźnie sformułowany problem badawczy, jednak większość rozdziału (dość krótkiego, bo tylko ss. 3) dotyczy wskazania na stosowane układy doładowania pulsacyjnego dla silników wielocylindrowych i na prowadzone wcześniej badania nad wykorzystaniem modelowania CFD w zastosowaniu do modeli 1-D i 3-D oraz sposobów generowania przepływów pulsacyjnych. W podsumowaniu tego omówienia Autor wskazał na występowania luki w stanie wiedzy pisząc: „Therefore, an evident research gap in the pulse turbocharging for multicylinder ICE was observed, and additional research had to be conducted. Particular attention deserved the two-stroke, multicylinder ICE as the desired interval between the cylinder exhaust phase was even shorter, which posed a severe issue for engines with pulse turbocharging systems.” Słowo “therefore” Autor odniósł do wcześniejszego akapitu w brzmieniu: “The reflected pressure wave reached the second cylinder during the exhaust phase and, as a result, deteriorated its scavenging process, leaving residual exhaust gases inside the combustion chamber. Consequently, the residual exhaust gases in the combustion chamber limited the fresh air in the cylinder at the next combustion phase, which led to higher fuel consumption and unsatisfactory emission”.

Ostatecznie trudno jest zrozumieć, o co Autorowi chodzi i co uznaje za podstawowy naukowy problem badawczy wymagający wyjaśnienia. Czy chodziło o dobór odstępów między pulsacjami ciśnienia spalin i czy po to, żeby zapewnić lepsze opróżnianie cylindra z reszty spalin, czy żeby zapewnić lepsze wykorzystanie energii kinetycznej pulsacji do zasilania turbiny?

Rodzi się tutaj pytanie, dlaczego Autor nie sformułował w tym miejscu problemu badawczego w taki sposób, w jaki odnosi się do niego na końcu pracy, w jej podsumowaniu pisząc, że głównym celem pracy było: “...design and validate the unique and novel model of turbocharging system, which could effectively separate the exhaust pulses from multiple cylinders and efficiently recover the heat energy from exhaust gasses.” (s. 145, w. 2-4).

Trzeba niestety stwierdzić, że rozdział 2 odstaje od zwyczajowo przyjętych standardów oraz zasad logicznego postępowania, choć w rozdziale 3 Autor te braki częściowo naprawia.

W rozdziale 3 Autor zapowiada sformułowanie głównych celów badawczych oraz zakres dysertacji. Zaczyna go dość niezręcznie pisząc: „This research investigated...”, gdyż „research” nie może być podmiotem czynnym; taki błąd pojawia się w pracy częściej. Wskazuje tutaj, że głównym celem badań jest badanie: „exhaust pulse separation problem for two-stroke, multicylinder ICE”. **Mam więc pytanie, dlaczego właśnie dla silników dwusuwowych, skoro współcześnie stanowią one raczej margines zastosowań (oczywiście z wyjątkiem silników napędu głównego statków) w obszarze silników średnich i małych, jakich przykłady Autor później przytacza.** Na rysunku 8 miejscu Autor przytoczył harmonogram swoich prac i badań w latach 2018 do 2024. Wskazane tutaj tematy i zadania szczegółowe są dość mocno zróżnicowane i bardzo trudno ułożyć je w logiczny łańcuch wzajemnie uzupełniających się zagadnień, które miałyby prowadzić do rozwiązania jednego konkretnego problemu naukowego i wyjaśnienia określonych współzależności funkcjonalnych, których oczekuje się od naukowej pracy promocyjnej.

Na s. 41 Autor napisał, że „This work's results will contribute to efficiency increase and emission reduction by manufacturing and commercializing the exhaust pulse separation device for four-stroke and two-stroke multicylinder ICE” (podkreśl. moje). I dalej: “problem included designing and assessing a novel exhaust pulse separation approach that eliminated the exhaust pressure wave interferences within the exhaust manifold and simplified the turbocharging system for multicylinder ICE”. Określenia te są bardzo obiecujące, ale mocno ogólnikowe i nie znajdują wyrazistego potwierdzenia w dalszej części pracy.

Przytoczone opisy i konstrukcja całej pracy sprawiają wrażenie „skomponowania” jej z dość niezależnie powstających części, trochę „na siłę” łączonych w jedno dzieło. Jak podano na s. 42-43 w zaliczonych do tej pracy publikacjach omówiono odpowiednio:

- w art. 1 – ocenę wskaźników operacyjnych silnika w zależności od ciśnienia doładowania,
 - określenie zmian profilu pulsacji przepływu masy spalin w zależności od ciśnienia doładowania;
 - w art. 2 – badania prawidłowego dopływu promieniowego do turbiny w dostępnych małych silnikach turbodoładowych;
 - w art. 3 – konstrukcję jednostopniowego układu turbodoładowania z rozdziałem pulsacji wlotu spalin w silniku sześciocyndrowym,
 - ocenę zdolności rozdziału pulsacji spalin w jednostopniowym układzie turbodoładowania;
- W kolejnych opracowaniach uwagę zwrócono na doładowanie dwustopniowe w odniesieniu do:
- w art. 4 – projektu dwustopniowego układu turbodoładowania, w którym pierwszy stopień zapewniał separację impulsów spalin, a drugi stopień – rzeczywisty odzysk energii,
 - oceny zdolności i sprawności dwustopniowego układu turbodoładowania w zakresie separacji impulsów;
 - w art. 5 – badań układu turbosprężarki VTG pod kątem osiągnięć silnika;
 - w art. 6 – opracowania modelu dwustopniowego układu turbodoładowania z układem VTG na turbinie drugiego stopnia,
 - ocenie dwustopniowego układu turbodoładowania VTG, w tym możliwości separacji impulsów i sprawności systemu;
 - w art. 7 – ulepszenia dwustopniowego układu turbodoładowania VTG z najnowszym wirnikiem.

Łatwo zauważyć, że przedmiotem tych opracowań były kolejno układy doładowania jednostopniowego, przepływ do turbiny silnika turbodoładowego (?), doładowania dwustopniowego i doładowania turbosprężarką typu VGT. Dotyczyły one więc różnych obiektów badawczych, o różnych cechach użytkowych i zasadzie działania, nie zaś jednego określonego związku przyczynowo-skutkowego, wspólnych cech lub zjawisk czy choćby identyfikacji określonych zjawisk lub procesów.

6. Analiza treści rozprawy

Treść rozdziałów 1-3 omówiono już wcześniej, więc tutaj zwrócę uwagę na rozdział 4 i kolejne.

Rozdział 4 Autor poświęcił (jak mówi tytuł rozdziału) turbosprężarkom i zasadzie turbodoładowania. Przedstawił na początku przykłady współczesnych turbosprężarek z upustem spalin, ze zmienną geometrią (VTG), ze wspomaganie elektrycznym i turbosprężarkę tzw. *Twin-scroll*. Graficznie zilustrował budowę turbosprężarki, z jakich głównych elementów się składa (rozd. 4.1), przedstawił także wykres teoretycznego obiegu mieszanego silnika turbodoładowanego oraz szkic przyrostu momentu obrotowego na charakterystyce pełnej mocy uzyskiwany w wyniku zastosowania turbodoładowania (rozd. 4.2). Dalej przytoczono schematy układu doładowania stałociśnieniowego i doładowania pulsacyjnego, a następnie nieco szerzej rozważono rozkład prędkości na łopatkach wirnika turbiny i wykres $h-s$ (entalpia wł. – entropia wł.) dla rozprężania spalin w turbinie. Rozdział ten pełni więc funkcję „wypełniacza”, bez istotnej wartości poznawczej dla przyjętego tematu pracy.

Umieszczone w tym rozdziale informacje mają charakter podręcznikowy, są prawdziwe, ale bardzo ogólnikowe i powszechnie znane studentom studiów energetycznych i transportowych,

a Autor nie wskazał, do czego one mogą być potrzebne w tej pracy i wykorzystane dla rozwiązania jakiego ze wskazanych wcześniej zagadnień.

Rozdział 5 został zatytułowany „Literature survey”, co uważam za błąd formalny, gdyż powinien on być poświęcony analizie stanu wiedzy na określone zagadnienia objęte badaniami, a „przeгляд literatury” stanowi jedynie technikę pozyskiwania niezbędnych informacji do oceny stanu wiedzy i wydedukowania stanu niewiedzy na przyjęty temat, problem, zagadnienie.

W pierwszym akapicie tego rozdziału (uwaga: tekst „wiszący”) Autor określa przedmiot tej analizy: w rozdz. 5.1 są to eksperymentalne badania pulsacyjnego zasilania turbosprężarki (raczej tylko turbiny), w rozdz. 5.2 – modelowanie jednowymiarowe takiego zasilania, w rozdz. 5.3 – modelowanie 2-D i 3-D.

W podrozdziale 5.1 przytoczono badania z lat 1998-2020 nad zasilaniem pulsacyjnym turbiny *twin-scroll* dla powietrza zimnego i podgrzewanego grzałką elektryczną i z generatorem pulsacji. Zwrócono także uwagę na badania turbiny dwuprzepływowej z efektem ejektorowym. Przytoczono interesujący wykres porównawczy zależności strumienia masy przepływającej przez turbinę w zależności od stopnia rozprężania dla przepływu stałociśnieniowego i pulsacyjnego (rys. 26). Pod koniec Autor stwierdził celowość kontynuacji prac nad poprawą sprawności pracy turbiny zasilanej pulsacyjnie, także w odniesieniu do turbin o zmiennej geometrii VTG. Stwierdzenie to uzasadnia podjęcie prac nad modelowaniem przepływu pulsacyjnego na wlocie do turbiny, co wskazało na celowość podjęcia studiów literaturowych w tym zakresie omówionych w rozdziale 5.2 w odniesieniu do modelowania 1-D, a w rozdziale 5.3 – w odniesieniu do modelowania 3-D.

W podsumowaniu rozdziału 5 Autor wskazuje dość liczne prace dotyczące układów turboładowania turbiną jedno- lub dwuprzepływową, ale dla silników czterosurowych o małych pojemnościach skokowych, w których częstotliwość pulsacji spalin jest relatywnie duża. Zauważa przy tym brak opracowań dotyczących układów doładowania dwustopniowego dla silników dwusurowych o większej częstotliwości pulsacji. Takie stwierdzenie Autor przyjął jako asumpt do podjęcia własnych badań nad procesami i właściwościami pulsacyjnego zasilania turbiny w odniesieniu do walidacji modeli symulacyjnych 3-D dla systemów doładowania jedno- i dwustopniowego (rozdz. 6, s. 77).

W podrozdziale 6.1 omówiono badania stanowiskowe nad wpływem ciśnienia doładowania na pulsacje wyptywu spalin w silniku z tłokami przeciwbieżnymi (OPE). Do badań wykorzystano własne stanowisko badawcze z zamontowanym silnikiem Pamar 4 z tłokami przeciwbieżnymi, doładowanym turbosprężarką Garrett GTD1244VZ oraz sprężarką wporową napędzaną mechanicznie, o mocy nom. 157 kW/3000 obr./min. Stanowisko to było wyposażone w aparaturę kontrolno-pomiarową zgodnie z obecnie przyjmowanymi standardami w badaniach naukowych (por. tab. 2 – tab. 4, s. 78, 80).

Niestety tutaj pojawiają się fragmenty, którym brak podsumowania lub jakiegoś wniosku. Np. na s. 80 Autor pisze o analizie niepewności i przytacza użyte w tym celu wzory, jednak nie kończy tego wnioskiem z wyniku tej analizy. Dalej, przytoczony jest wykres (rys. 51) profilu pulsacji strumienia masy wlotowej dla silnika 6-cylindrowego, ale brak jest komentarza, co z niego wynika i do czego on Autorowi posłużył. Podobnie jak rysunki 52 a-d oraz 53 a-c, które może wskazują na sprawność Autora w operowaniu modelowaniem 3-D, jednak nie zostały one „osadzone” w wątku badawczym pracy. Podobnie jest odnośnie rysunków 55, 56 i 59.

Na zakończenie tego rozdziału Autor pisze: „The simulations were carried out for three engine revolutions to achieve the satisfied convergence results. The numerical model investigated the mass-flow rate separation at the first-stage rotor inlet from the adjacent exhaust pipes and the efficiency, pressure, and temperature of each rotor stage for different turbine speeds and VTG openings.” Po pierwsze zatem nie podano, jak ilościowo oceniono wspomnianą tutaj zbieżność, po drugie model nie jest podmiotem czynnym i sam nie może badać, po trzecie, gdzie są wyniki tych badań, żeby można je ocenić pod względem jakościowym i ilościowym. Myślę, że jest brak

tutaj odwołania do przytoczonych w pracy artykułów lub kolejnych stron tej pracy (np. rozdz. 7.4, s. 108).

W rozdziale 7 Autor przytacza omówienia siedmiu artykułów wskazanych jako elementy składowe dysertacji, których streszczenia zamieszczono w części 2 pracy (Part 2). Jednak ani w tym rozdziale, ani w części 2 nie wskazano na współautorski charakter tych artykułów, a jedynie ze spisu literatury można stwierdzić, że w odniesieniu do 6 pozycji współautorem był promotor pomocniczy dr Paweł Mazuro, a w artykule nr 6 także promotor prof. Andrzej Teodorczyk. Brak takich informacji w części 2 opiniowanej pracy promocyjnej może wskazywać na chęć zrzecznego zatajenia współautorstwa innych osób.

W podrozdziale 7.1 omawiane są wyniki badań wskaźników operacyjnych prototypowego silnika lotniczego z tłokami przeciwbieżnymi¹ dla różnych wartości ciśnienia doładowania. Jak pisze Autor: „This research aimed to prove that turbocharging is one of the primary solutions to improve engine performance and, therefore, reduce harmful emissions of GHGs to the atmosphere. Additionally, the research allowed us to establish the mass-flow rate boundary condition for the 3-D numerical model of the turbocharging system”. Cele wskazane w pierwszym zdaniu są w świetle dotychczasowej wiedzy raczej oczywiste. Bardziej istotne wydaje się więc tutaj określenie doświadczalnych parametrów do identyfikacji modelu symulacyjnego 3-D potrzebnego w dalszej części badań.

Wykorzystane do badań stanowisko pomiarowe i jego oprzyrządowanie nie budzi zastrzeżeń, choć jednak stwierdzenie, że temperatura wewnątrz cylindra była określana na podstawie pomiarów ścianki komory spalania z wykorzystaniem termopar typu K (s. 90) wywołuje wątpliwości ze względu na jej mocno niestacjonarny charakter.

W podsumowaniu tego podrozdziału Autor stwierdza, że zwiększenie ciśnienia doładowania (o ile?) pozwoliło uzyskać sprawność cieplną silnika 49,2%, ale skutkowało to też bardzo dużymi wartościami maksymalnego ciśnienia w cylindrze (28,27 MPa) oraz temperatury ścianek cylindra (900 K). Myślę, że uzyskane wartości nie powinny stanowić zaskoczenia w świetle znanych z literatury wyników innych badań. Ponadto wskazane skutki ilościowe powinny być powiązane z przyczynami wyrażonymi także ilościowo.

W podrozdziale 7.2, który ma charakter studium literaturowego, omówiono zastosowanie turbiny gazowej jako rekuperatora energii cieplnej w lotniczym silniku turbodoładowym. Na zakończenie stwierdzono istnienie ograniczeń współczesnych turbosprężarek ze względu na maksymalne temperatury pracy i wartości masowego natężenia przepływu oraz pozwoliło na określenie takich ograniczeń dla projektowanego układu turbodoładowania z pożądanym natężeniem przepływu spalin, prędkością obrotową i temperaturą wlotowej turbiny.

W podrozdziale 7.3. omawiane są badania oryginalnego modelu turbiny zasilanej w sposób pulsacyjny. W modelu 3-D zastosowano nowatorską piastę wlotową, która rozdziela impulsy ciśnienia między sąsiednimi przewodami wydechowymi. W podsumowaniu stwierdzono możliwość unikalnego i nowatorskiego podejścia do eliminacji zakłóceń między pulsacjami spalin w układzie wydechowym dwusuwowego, sześciocylindrowego silnika z tłokami przeciwsobnymi, gdyż pomimo pulsacyjnego przepływu na wlocie turbiny, wirnik zachowywał się w sposób niemal jednostajny, biorąc pod uwagę całkowity przepływ z każdego przewodu wydechowego. Stwierdzono możliwość zwiększenia sprawności układu turbinowego oraz że całkowita sprawność statyczna układu turbinowego była stosunkowo mała i wahała się od 44% do 51% dla największej prędkości turbiny (czyli jakiej?).

Podrozdział 7.4 posłużył do omówienia dwustopniowego układu turbodoładowania opartego na wynikach z wcześniejszych symulacji 3D jednostopniowego układu turbodoładowania.

¹ Współcześnie zwane też silnikami rewolwerowymi, dawniej znane pod określeniem silnika baryłkowego (ang.: *barrel engine*).

Uwzględniono tutaj nowatorstwo polegające na oddzieleniu impulsów spalin w pierwszym stopniu i rzeczywistym odzysku ciepła w wirniku drugiego stopnia.

Przytoczone tutaj wykresy 79, 80, 81, 82, 83, 84 są bardzo zmniejszone i trudno czytelne, a to właśnie one powinny stanowić istotę osiągnięć badań relacjonowanych w tym rozdziale i być podstawą omówienia wyników i formułowania wniosków. Jednak ich omówienie jest dość skrótowe a Autor skoncentrował się bardziej na następujących wnioskach końcowych:

- w dwustopniowym układzie turbodoładowania można rozdzielić separację impulsów spalin od odzysku ciepła w dwóch stopniach rozprężających;
- badania wykazały znaczny wzrost całkowitej sprawności statycznej całego układu turbodoładowania uzyskując największą różnicę wynoszącą 7% przy małej prędkości obrotowej turbiny;
- jednak obecność wirnika drugiego stopnia znacznie zwiększyła przeciwcisnienie w układzie wydechowym, co pogorszyło wydajność wirnika pierwszego stopnia.

Tutaj ponownie Autor wykazuje skłonność do formułowania wniosków jakościowych bez wcześniejszego wskazania zależności ilościowych. Jak np. interpretować stwierdzenie o różnicy sprawności 7% przy małej (czyli jakiej?) prędkości obrotowej turbiny?

Rozdział 7.5 poświęcono zagadnieniu polepszenia wskaźników operacyjnych silnika przy zastosowaniu turbiny ze zmienną geometrią (VGT). Uzyskane wyniki przedstawiono na wykresach 87-91 w zależności od stopnia wychylenia łopatek kierownicy turbiny oraz od prędkości obrotowej. Stwierdzono, że:

- przy maksymalnym wychyleniu łopatek można zwiększyć sprawność cieplną silnika do 51,2% przy największym obciążeniu silnika,
- zamknięcie łopatek VTG w warunkach dużego obciążenia i prędkości znacznie poprawiło warunki wewnątrz cylindra a maksymalne ciśnienie w cylindrze zwiększyło się do 28,73 MPa a temperatura ścianek komory spalania przekroczyła 900 K,
- wraz z dalszym domknięciem łopatek VTG stwierdzono zwiększenie przeciwcisnienia spalin prowadzące do pogorszenia sprawności cieplnej silnika i wystąpienia spalania stukowego.

Powyższe sformułowania nie pozwalają ocenić, czy są to wartości odpowiadające jednym konkretnym nastawom operacyjnych, czy mogą wskazywać na ogólniejszą tendencję.

W podrozdziale 7.6 omówiono badania wpływu zmian ustawienia łopatek kierownicy turbiny drugiego stopnia. Przeprowadzono badania symulacyjne dla trzech różnych prędkości turbiny: 60 000, 50 000 i 40 000 obr./min, oraz trzech pozycji łopatek VTG oraz dla prędkości obrotowej silnika 1500 obr./min, co dało częstotliwość pulsacji spalin 150 Hz. Stwierdzono wystarczającą zgodność wyników symulacji z wynikami pomiarów, co przedstawiono na rysunku 96. Po przeprowadzonych badaniach symulacyjnych, których wyniki przedstawiono na rysunkach 99-101 stwierdzono, że:

- potwierdzono rozdział pulsacji pomiędzy poszczególnymi przewodami wylotowymi przy różnych położeniach łopatek kierownic turbiny VTG w doładowaniu dwustopniowym,
- dokonano oceny sprawności pracy obu stopni turbinowych przy minimalnym i maksymalnym wychyleniu łopatek, oraz stwierdzono, że zamknięcie VTG znacznie poprawiło sprawność wirnika drugiego stopnia, w którym sprawność zmieniała się o 50% przy największej prędkości turbiny i maksymalnym zamknięciu VTG,
- jednocześnie stwierdzono, że zamknięcie VTG miało minimalny wpływ na wirnik pierwszego stopnia, w którym zmiana sprawności nie przekraczała 5% przy maksymalnym zamknięciu łopatek VTG,
- stwierdzono także, że zmiany ciśnienia zasilania wirnika drugiego stopnia były mniejsze niż wirnika pierwszego stopnia, co oznaczało prawidłowe rozdzielanie impulsów spalin w pierwszym stopniu,

- ostatecznie potwierdzono, że największa sprawność całkowita statyczna całego dwustopniowego układu turbodoładowania przekraczała 60% przy największej prędkości obrotowej turbiny i maksymalnym zamknięciu VTG, która była o 5,1% większa niż sprawność stałopatkowego, dwustopniowego układu turbodoładowania przedstawionego w art. 4.

W podrozdziale 7.7 omówiono efekt zastosowania w drugim stopniu rozprężającym wirnika turbiny najnowszej konstrukcji zamiast wirnika starszej wersji K44. Uzyskane wyniki zilustrowane na wykresach 104, 107, 110, 111 pozwoliły na stwierdzenie, że:

- wirnik pierwszego stopnia był poddawany silnemu pulsacyjnemu przepływowi z każdego przewodu wydechowego, w związku z czym oscylacje ciśnienia w wirniku pierwszego stopnia były znacznie wyższe niż oscylacje ciśnienia w wirniku drugiego stopnia; obserwacje te dowiodły, że dwustopniowy układ turbodoładowania działał zgodnie ze swoimi założeniami konstrukcyjnymi – skutecznie rozdzielał pulsacje spalin z przewodów wydechowych. Jednak biorąc pod uwagę obie geometrie wirnika, geometria wirnika nowego typu zapewniała mniejsze pulsacje ciśnienia ze względu na mniejszą liczbę łopatek,
- korzystne położenie łopatek VTG zwiększyło całkowitą sprawność statyczną wirnika drugiego stopnia; domknięcie łopatek VTG znacznie zwiększyło wydajność wirnika drugiego stopnia, szczególnie w przypadku geometrii wirnika nowego typu, dzięki lepiej zoptymalizowanej geometrii łopatek i mniejszej liczbie łopatek.

W rozdziale 8 Autor zamieścił podsumowanie i wnioski. Badania eksperymentalne przy różnych ciśnieniach doładowania stanowiły podstawę do sformułowania modelu typu CFD dla układu turbodoładowania. Stanowisko badawcze zostało przystosowane do pomiaru momentu obrotowego silnika i analizy emisji związków toksycznych w spalinach.

Rozważając wpływ ciśnienia dolotowego na osiągi silnika ze stałą turbosprężarką VTG, Autor wyciągnął następujące wnioski:

- sama zmiana ciśnienia dolotowego może do pewnego stopnia zwiększyć osiągi silnika, ograniczone przez wytrzymałość układu dolotowego,
- bezpieczna poprawa ciśnienia dolotowego może być przeprowadzona do 250 kPa bez konieczności modyfikacji układu dolotowego; aby osiągnąć większe wartości ciśnienia dolotowego, konieczne było znaczne ulepszenie układu dolotowego i zastosowania chłodzenia powietrza doładowującego,
- przy ekstremalnych wartościach ciśnienia dolotowego parametry w cylindrze znacznie przekraczają warunki nominalne spotykane w silnikach komercyjnych, co budzi duże obawy o niezawodność silnika.
- przy prawidłowym zarządzaniu układem dolotowym można osiągnąć zwiększenie sprawności cieplnej silnika do 50%.

Eksperymentalny profil ciśnienia spalin został wykorzystany jako warunek początkowy dla utworzenia modelu turbodoładowania CFD. Iteracyjnie przeprowadzono szereg symulacji numerycznych na trzech różnych modelach układów turbodoładowania, począwszy od układu jednostopniowego, przez dwustopniowy układ turbodoładowania, aż po dwustopniowy układ turbodoładowania z łopatkami dyszowymi VTG.

Model został zaprojektowany w oparciu o skalowany wirnik turbiny i unikalną skrzynię wlotową, składającą się z sześciu przewodów wydechowych połączonych z oddzielnym cylindrem. Stwierdzono przy tym, że:

- jednostopniowy model pozwolił na symulowanie osiągow dwusuwowego, sześciocylinrowego silnika dla pulsacyjnego przepływu spalin,
- model dokładnie oddzielił strumień spalin od sąsiednich przewodów wydechowych podczas pojedynczego obrotu silnika z niewielkimi przedmuchami pomiędzy przewodami wydechowymi nieprzekraczającymi 5% całkowitego masowego natężenia przepływu,

- pomimo skutecznej separacji pulsacji system zapewniał niewielki odzysk ciepła odpadowego; tym samym całkowita sprawność statyczna nie przekraczała 50%.
- Dwustopniowy układ turbiny został zaprojektowany i zasyulowany w warunkach przejściowego, pulsacyjnego przepływu spalin. Wyniki symulacji podsumowano w następujący sposób:
- model dwustopniowy tworzyły dwa oddzielne wirniki; pierwszy wirnik (pierwszy stopień) działał jako separator impulsów spalin, podczas gdy drugi wirnik (drugi stopień) działał jako właściwy stopień rozprężania,
- kolejny model nie tylko poprawił możliwości separacji impulsów, ale poprawił wydajność całego systemu,
- nieszczelność między sąsiednimi przewodami wydechowymi zmniejszyła się do 4,2 % całkowitego masowego natężenia przepływu,
- zaobserwowano znaczną poprawę sprawności wirnika pierwszego i drugiego stopnia, co spowodowało wzrost sprawności systemu dwustopniowego nawet do 51%.
- Ponieważ jednak wartości sprawności były nadal mniejsze niż sprawność najnowocześniejszych turbosprężarek dostępnych na rynku, zastosowano turbinę ze zmienną geometrią VTG. Eksperymentalne stanowisko testowe zostało dostosowane do oceny osiągnięć silnika przy różnych stopniach otwarcia łopatek kierownicy turbiny VTG. Stwierdzono, że wdrożenie turbosprężarki VTG przyniosło następujące efekty:
- turbosprężarka VTG może zwiększyć lub pogorszyć osiągi silnika; badania wykazały, że dzięki zoptymalizowanemu uruchamianiu systemu VTG, sprawność cieplna silnika może być zwiększona do 51%,
- stwierdzono jednak, że nieefektywne dopasowanie turbosprężarki VTG do silnika może znacząco pogorszyć jego osiągi, a dalsze zamykanie łopatek kierownicy VTG prowadzi do nadmiernego wzrostu przeciwcisnienia, co zmniejsza sprawność cieplną nawet o około 4,4 – 5,8%,
- pozytywnym efektem turbodoładowania turbosprężarką VTG była zmniejszona emisja NOx i CO₂.
- Testy eksperymentalne silnika wyposażonego w turbosprężarkę VTG stanowiły bazę dla identyfikacji modelu CFD dwustopniowego układu turbodoładowania dla różnych stopni otwarcia łopatek kierownicy turbiny. Z badań symulacyjnych dwustopniowego układu turbodoładowania VTG wyciągnięto następujące wnioski:
- układ VTG zapewniał kontrolę nad przeciwcisnieniem wewnątrz układu turbodoładowania,
- dodatkowo wyniki badań wykazały, że zamknięcie VTG zwiększyło przedmuchy pomiędzy sąsiednimi przewodami wydechowymi, przy czym maksymalny przedmuch sięgał nawet 12,1% całkowitego przepływu masy spalin przez przewody wydechowe podczas jednego obrotu silnika,
- mimo to całkowita sprawność modelu z turbodoładowaniem przekroczyła 60% przy maksymalnym zamknięciu VTG, co dowiodło, że turbosprężarka VTG poprawiła wydajność systemu,
- dwustopniowy system można jeszcze udoskonalić dzięki najnowszemu najnowocześniejszemu wirnikowi turbiny; wyniki badań wykazały, że lepiej zoptymalizowany wirnik turbiny może zwiększyć wydajność systemu dwustopniowego o 5,2%.
- Ostatecznie Autor wskazuje na następujące najważniejsze nowatorskie osiągnięcia pracy:
- badania dostarczają danych eksperymentalnych na temat ekstremalnych warunków pracy silników, które są rzadkością w przypadku silników komercyjnych ze względu na wyjątkowo wysokie wartości ciśnienia dolotowego,
- dwustopniowy układ turbinowy został opracowany wyłącznie dla dwusuwowych i czterosuwowych silników wielocylindrowych,
- stanowi unikalne i proste rozwiązanie eliminujące zakłócenia fal ciśnienia spalin w układzie wydechowym dla silników wielocylindrowych bez stosowania wielu turbosprężarek,

- obiecująca poprawa wydajności systemu dwustopniowego została osiągnięta przez oddzielenie etapu separacji impulsów od etapu odzysku ciepła,
- regulacja przeciwi ciśnienia odbywa się poprzez uchylenie łopatek VTG, co również poprawia przyspieszenie silnika w warunkach małego obciążenia.

W tym miejscu pojawia się istotna wątpliwość, czy Autor uważa zastosowanie turbodoładowania dwustopniowego za swoje istotne osiągnięcie? Przecież nie jest to rozwiązanie nowe. Czy może chodzi o szczególny dobór obu stopni rozprężających dla osiągnięcia lepszego rozdziału pulsacji ciśnienia spalin oraz uzyskania efektu odzysku energii cieplnej w drugim stopniu rozprężającym? Jeżeli tak, to jakie są bardziej szczegółowe wytyczne dla doboru parametrów konstrukcyjnych lub regulacyjnych obu stopni i regulacji stopnia uchylenia łopatek VTG? W zamieszczonych w pracy dość ogólnikowych opisach brak jest moim zdaniem „kropki nad i”, a szczególnie wyraźniejszej próby zdiagnozowania i opisania funkcjonalnego podstawowych związków przyczynowo-skutkowych.

W ostatnim 9. rozdziale (Suggestions for further research) Autor stwierdza, że:

- badania dotyczyły problemu zakłóceń fal wydechowych z dwusuwowych, sześciocyndrowych silników; prezentowany model skutecznie odseparował i zredukował nieszczelności (Uwaga! Czy to może zrobić model?) pomiędzy sąsiednimi przewodami wydechowymi do 4,2% całkowitego masowego natężenia przepływu przez system,
- sprawność układu pozostawała jednak niezadowolająca w porównaniu z najnowocześniejszymi turbosprężarkami; w związku z tym przeprowadzone zostaną dodatkowe badania mające na celu zwiększenie wydajności prezentowanego systemu,
- dodatkowo dwustopniowy układ turbodoładowania zostanie zmodyfikowany tak, aby pasował do bardziej złożonych i wymagających układów wydechowych z silników ośmio-, dziesięcio- i dwunastocyndrowych.

Niestety przytoczone tutaj sugestie Autora nie wskazują, co i jak konkretnie należałoby jeszcze zrobić, aby poszukiwać dalszej poprawy podstawowych wskaźników operacyjnych tak wyposażonego silnika. Sformułowania: „dodatkowe badania mające na celu zwiększenie wydajności...” albo „układ turbodoładowania zostanie zmodyfikowany tak, aby pasował (co to znaczy? Wg jakiego kryterium?) do bardziej złożonych i wymagających układów wydechowych” nie wskazują żadnych konkretnych zamierzeń ani zaleceń.

7. Adekwatność i prawidłowość przyjętej metody badawczej i zastosowanej metodyki

Odnosząc się do schematu pożądanego postępowania przy wykonywaniu prac naukowych (por. s. 2 tej recenzji) można uznać, że Autor dokonał wprowadzenia do problematyki pracy, ocenił stan obecnej wiedzy w interesującym Go zakresie i wskazał na pewne luki wymagające uzupełnienia. Na tej podstawie sformułował ogólny problem badawczy oraz dokonał jego podziału na szczegółowe zadania badawcze (por. s. 40), które następnie stały się przedmiotem szczegółowego opisu w kolejnych publikacjach składających się na tę dysertację.

Część wskazanych zadań szczegółowych wymagała opracowania i uruchomienia stanowiska badawczo-pomiarowego, którego budowę i najważniejsze parametry kontrolne omówiono w rozdziale 6. Stanowisko to zostało wykorzystane do badań omówionych w artykułach 1 i 5 (rozd. 7.1, 7.5), a wyniki stanowiły podstawę identyfikacji modelu symulacyjnego wykorzystanego w badaniach omówionych w artykułach 3, 4, 6 i 7 (rozd. 7.3; 7.4; 7.6; 7.7).

Można więc przyjąć, że metoda badawcza została przez Autora zdefiniowana i skutecznie wykorzystana do generowania wyników dla przyjętych obiektów badawczych, konfiguracji przedmiotu badań oraz parametrów sterujących. Uzyskane wyniki pomiarowe oraz wyniki badań symulacyjnych zostały przedstawione na charakterystykach odpowiednich do analizowanego zagadnienia i poddane interpretacji.

Należy uznać, że Autor wygenerował wiele wyników eksperymentalnych i symulacyjnych i je przedstawił graficznie w sposób właściwy, choć niektóre z wykresów (np.: 107, 111, 112, 113) są bardzo pomniejszone i przez to trudno czytelne.

Przyjęte w pracy metody badawcze należy moim zdaniem uznać za poprawne a zastosowaną metodykę badań za właściwą. Jedyne zastrzeżenia budzi nazywanie spostrzeżeń i obserwacji badawczych wnioskami, gdyż wnioskowanie wymaga wskazania na występowanie zależności przyczynowo-skutkowych (typu deterministycznego lub stochastycznego), a wnioski ilościowe powinny stanowić podstawę do formułowania wniosków uogólnionych typu jakościowego.

8. Uwagi szczegółowe dotyczące redakcji pracy

Przedstawiona do oceny praca jest kompletna, gdyż zawiera wszystkie elementy wymagane w promocyjnej pracy naukowej: Streszczenie, *Abstract*, spisy rysunków i tabel, spis oznaczeń i skrótów oraz bibliografię. Tekst jest bogato ilustrowany, a wykorzystane rysunki (prawie wszystkie) są opracowane przejrzysto, a umieszczone na nich wielkości są wyjaśnione.

Praca została wydana jako druk zwarty przez Politechnikę Warszawską (logo na okładce), jednak na stronie redakcyjnej nie został wskazany udział wydawnictwa uczelnianego, co oznacza brak sformalizowanego opracowania redakcyjnego. Wprawdzie tekst i szata edytorska zostały opracowane bardzo starannie, jednak nie zachowano polskich zasad edytorskich; w tekście występują „wiszące” teksty (s. 44, 55, 77, 89), podpisy pod rysunkami kończące się kropką. Spisy rysunków i tabel umieszczono na początku tekstu zasadniczego, zamiast zwyczajowo na jego końcu (s. 15-22). Oczywiście nie jest to błędem, a jedynie odstępstwem od przyjętego zwyczaju.

Gorsze wrażenie robi częste używanie formy czynnej dla przedmiotów nieożywionych, np.: „Fig. 5 compares...” (s. 31), „this chapter reviews...” (s. 55), „this chapter describes...” (s. 77), „The article presented...” (89), „The present article investigated...” (s. 100), podczas gdy ani rozdział, ani artykuł nie są podmiotami czynnymi i one same nie mogą opisywać/prezentować, a jedynie można w nich opisywać/prezentować... Niestety, takie błędy zdarzają się coraz częściej, nie tylko w tej pracy.

W tekście pracy wielokrotnie używa się pojęcia „engine revolutions”, podczas gdy zwyczajowo pisze się „engine speed” rozumiejąc to jako prędkość obrotową wału korbowego silnika.

Zauważyłem kilka niepoprawności edytorskich wartych poprawy w przyszłych pracach Autora: np. na s. 120 – powinno się pisać 900 K, a nie 900°K, nadużywa się słowa „wysoki” zamiast „duży” albo „niski” zamiast „mały” w odniesieniu do wartości liczbowych kreślonych wielkości fizycznych.

Sposób obłamania tekstu nie jest zbyt efektywny, gdyż pozostają w niektórych miejscach całe znaczne fragmenty stron nie wypełnione tekstem (np. s. 28, 31, 78, 79, 82 itp.), na co nie znajduję uzasadnienia. Niektóre wykresy (np.: 107, 111, 112, 113) są tak zmniejszone, że praktycznie nieczytelne.

Nie stwierdziłem żadnych istotnych błędów językowych, składniowych ani literowych, co w pracach pisanych w języku obcym jest trudne do osiągnięcia. Pochwały wymaga konsekwentna i bardzo uważna redakcja całości pracy oraz opracowanie jej strony graficznej, a także wydanie jej w postaci tzw. wydawnictwa zwartego.

9. Najważniejsze osiągnięcia pracy

Do najważniejszych osiągnięć pracy można – moim zdaniem – zaliczyć przygotowanie i uruchomienie badań stanowiskowych przebiegu zjawisk dynamicznych zachodzących w układzie wylotowym turbodoładowanego dwusuwowego silnika z tłokami przeciwbieżnymi oraz analizę stopnia pulsacyjności zasilania turbiny układu doładowującego. Wyniki takich badań poddano analizie i interpretacji, a także wykorzystano do identyfikacji modelu matematycznego

oraz programu symulacyjnego typu CFD pozwalającego na wariantowe badania symulacyjne różnych wariantów układów wylotowych spalin. Uzyskany model symulacyjny okazał się przydatny do przewidywania dynamicznego pulsacyjnego obciążenia łopatek wirnika turbiny dla różnych wariantów prędkości obrotowej i obciążenia silnika.

Ponieważ Autor na podstawie studiów literatury i posiadanej swojej wiedzy sformułował naukowy problem badawczy, wybrał właściwą metodę badawczą, skutecznie ją zrealizował i zinterpretował osiągnięte wyniki można uznać, że spełnił wymagania ustawowe dotyczące dysertabilności pracy doktorskiej.

Trzeba pamiętać, że jeżeli praca promocyjna ma charakter pracy zbiorowej (współautorskiej), to niezbędne jest precyzyjne określenie zakresu i charakteru udziału w niej osoby uczestniczącej w procedurze promocyjnej. W takim więc przypadku, jeżeli współautorskie prace mają stanowić podstawę pracy promocyjnej, to niezbędne jest dołączenie oświadczenia współautorów w odpowiednim zakresie to poświadczające. Na domiar złego, Autor dysertacji omawiając te publikacje pisze o autorach w liczbie mnogiej (s. 89, 93-2x, 96, 100, 101, 104, 108 itd.), co podważa Jego prawa do wyłącznego autorstwa przytaczanych wyników. Jest oczywiste, że współcześnie prowadzone badania naukowe i aplikacyjne – ze względu na swoją złożoność i konieczność obsługi urzędów badawczych – wymagają udziału osób trzecich, lecz powinien on być jasno i wyraźnie określony dla prawidłowej oceny kwalifikacji promowanego kandydata i zachowania poprawności procesowej doktoryzowania.

Na moją wyraźną prośbę w dniu 29.08 br. otrzymałem oświadczenia współautorów o zakresie ich udziału w poszczególnych publikacjach wskazanych w tym doktoracie. Wynika z nich, że udział Doktoranta był w każdej z nich większościowy i przekraczał od 55 (publikacje 4, 7) do 85% (publ. 3). Zwraca jednak uwagę, że udział koncepcyjny został oszacowany na 5-10%, a udział w badaniach (eksperymentalnych i obliczeniowych) wynosił 20-45%; reszta udziału dotyczyła prac analitycznych dotyczących literatury i wyników badań.

10. Podsumowanie oceny

Przedstawiona do oceny rozprawa jest opracowaniem zwartym, w którym opisano kolejne etapy podjętych badań nad rozdziałem pulsacji wypływu gazów wylotowych z silnika wielocylindrowego na wlot turbiny układu turbodoładowania. Stanowi ono syntezę wyników badań opracowanych wcześniej w postaci 7 współautorskich publikacji naukowych w czasopismach: *Energies*, vol. 14, 2021, vol. 16, 2023, *SAE Technical Papers*, (2020), *Energy Conversion and Management*, vol. 269, 2022, *Applied Thermal Engineering*, vol. 236, 2023, *Int. J. Turbomach. Propuls. Power*, vol. 5, 2020, *Energy Conversion and Management Journal*, 2022, a więc czasopism o uznanym poziomie naukowym. Zgodnie z oceną zawartą w punkcie 9 tej oceny Doktorant miał w tych publikacjach udział większościowy i wykazał się znacznym udziałem w przygotowaniu i przeprowadzeniu badań doświadczalnych, zarówno stanowiskowych, jak i numerycznych.

Przeprowadzona i omówiona przez Autora synteza wiedzy na temat zagadnień doładowania silników tłokowych oraz specyfiki turbodoładowania pulsacyjnego wskazuje na istotne poszerzenie jego wiedzy specjalistycznej oraz wystarczające kwalifikacje do formułowania pytań badawczych i doboru sposobu i metod ich rozwiązywania. Tym samym spełnił On wymagania ustawowe dotyczące samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, gdyż zgodnie z zapisami Ustawy Prawo o Szkolnictwie Wyższym rozprawa doktorska ma prezentować ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie, która reprezentuje oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej (art. 187, pkt. 1).

Można w związku z tym stwierdzić, że Doktorant w sposób oryginalny (eksperymentalny i symulacyjny) rozwiązał problem naukowy polegający na krytycznej badawczej ocenie po-

wstawania i rozdziału pulsacji gazów wylotowych na zasilaniu turbiny układu turbodoładowania tłokowego silnika spalinowego. Tym samym spełnił wymagania zapisane w Ustawie, w art. 187, pkt. 2.

11. Wniosek końcowy

Ostatecznie, oceniając pozytywnie treść rozprawy, jej warstwę badawczą i studyjną oraz osiągnięcia Autora w zakresie prowadzenia złożonych badań naukowych uważam, że rozprawa doktorska przedstawiona przez mgr. inż. Dariusza Kozaka stanowi oryginalne rozwiązanie sformułowanego przez Niego naukowego problemu badawczego oraz wskazuje na Jego ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, spełnia więc wymagania ustawy *Prawo o Szkolnictwie Wyższym* z dnia 20 lipca 2018 r., (Dz. U. poz. 1668) z późniejszymi zmianami (Dz.U. 2022 poz. 574, Dz.U.2023.742, Dz.U.2023.212), wchodzącymi w życie z dniem 1 maja 2023 r., a szczególnie wymagania w zakresie dotyczącym rozpraw doktorskich określone w Dziale V *Stopnie i tytuł w systemie szkolnictwa wyższego i nauki*, Rozdz. 2, *Nadawanie stopnia doktora*, Art. 187.

Stawiam więc wniosek o dopuszczenie Autora do publicznej obrony.

Biorąc pod uwagę konstatacje przedstawione w punktach 10 i 11 tej opinii wyrażam swoje przekonanie, że Kandydat nabył wystarczające kwalifikacje naukowe do samodzielnej pracy badawczej i – po prawidłowym przebiegu obrony – będę popierać wniosek o nadanie Mu stopnia naukowego doktora nauk technicznych.

Krzysztof Wisłocki