

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Wisłocki

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, 8.09.2023 r.

OCENA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Tomasza Kosztyły pt.:

Opracowanie systemu nagrzewania silnika spalinowego z hybrydowym układem napędowym przy zastosowaniu akumulatora ciepła

- 1. Podstawa opinii:** pismo Prodziekana Rady Naukowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej prof. dr hab. inż. Marka S. Kozenia z dn. 14.06.2023 r., sygn. M.00-81/2023, które otrzymałem w dniu 20.06.2023 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. Tomasza Kosztyły zawiera 121 strony druku, w tym 111 stron zasadniczego tekstu (podzielonego na 10 rozdziałów), spis treści, streszczenie w języku polskim i angielskim, wykaz oznaczeń, skrótów i symboli oraz 6,5 stron spisu literatury. W pracy umieszczono 55 rysunków i wykresów, 11 tabel oraz 49 ponumerowanych wzorów. Bibliografia obejmuje 96 pozycje, z tego ok. 32% publikacje zagraniczne, z okresu ostatnich kilkunastu lat. Praca jest napisana w języku polskim na Politechnice Krakowskiej w 2023 r., w formacie A4, w oprawie twardej.
- 4. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Józef Tutaj, prof. PK, a promotorem pomocniczym: dr hab. inż. Damian Muniak, prof. PK.**

5. Ogólna ocena rozprawy

W pracy zawarto syntezę stanu wiedzy dotyczącej podejmowanych w niej zagadnień, przedstawienie koncepcji modernizacji układu chodzenia silnikowego napędu hybrydowego, sformułowanie problemu/zagadnienia naukowego i tezy pracy, omówienie wyników badań modelowych oraz badań eksperymentalnych, podsumowanie uzyskanych wyników i wniosków dla dalszych badań. Praca jest zatem całościowym i konsekwentnym przedstawieniem przeprowadzonych przez Doktoranta badań.

Podjęta przez Autora analiza źródeł została oparta na bogatej literaturze przedmiotu obejmującej 96 pozycje; zaledwie kilka z nich pochodzi sprzed 2000 r., więc jest to literatura najnowsza. Ponad 30% stanowi literatura zagraniczna. Analizując przytoczoną literaturę pod względem formalnym i pod względem merytorycznym można uznać, że synteza aktualnego

stanu wiedzy została przeprowadzona w sposób wyczerpujący, a sformułowanej na tej podstawie wnioski są poprawne.

Praca jest napisana w sposób komunikatywny, z dużą starannością; prawie nie spotyka się błędów literowych i fleksyjnych, częstych w innych pracach. Mam jedynie wrażenie, że z niektórych wyników można jeszcze uzyskać więcej informacji dotyczących zależności przyczynowo-skutkowych dotyczących obserwowanych i analizowanych procesów, co jednak może być przedmiotem rozważań Autora w przyszłości.

Autor nie sformułował wyraźnie problemu badawczego, ale sformułował tezę naukową w sposób wystarczająco jednoznaczny. Dla jej udowodnienia przyjął procedurę badawczą skonstruowaną zgodnie z przyjętymi standardami: od analizy stanu wiedzy i sformułowania tezy i celu pracy, poprzez badania wstępne (eksperymentalne i symulacyjne) do badań zasadniczych (drogowych), opracowania wyników i sformułowania wniosków końcowych.

Ogólna ocena rozprawy i jej zawartości naukowo-badawczej nie budzi zastrzeżeń. Uważam zatem, że praca jest zgodna z wymaganiami Art. 187 pkt. 3 i 4 *Ustawy*.

6. Ogólna charakterystyka problematyki poruszanej w rozprawie

6.1. Aktualność podejmowanej problematyki badawczej

Doktorant pan Tomasz Kosztyla podjął w swojej pracy badawczej zagadnienie efektywnego zarządzania stanem cieplnym silnika spalinowego pracującego w układzie napędu hybrydowego, szczególnie w okresie tzw. zimnego rozruchu i nagrzewania, w celu zwiększenia jego skumulowanej sprawności cieplnej oraz racjonalizacji emisji związków toksycznych w jego spalinach.

Biorąc pod uwagę stale zwiększającą się powszechność stosowania hybrydowych zespołów napędowych w pojazdach samochodowych oraz występujące w takich napędach rezerwy w polepszeniu ich sprawności cieplnej, przedmiot badań i analiz został przez Autora wybrany właściwie. Racjonalne zarządzanie przepływem strumienia ciepła wytwarzanego w takim układzie napędowym poddawanych dynamicznie zmieniającym się obciążeniami może stanowić źródło istotnej poprawy ekonomiki eksploatacji. Przy pracy silnika w warunkach dużych obciążeń sprzyjających dużym wartościom sprawności cieplnej wytwarzana jest znaczna ilość ciepła procesowego, które w warunkach małych obciążeń eksploatacyjnych pojazdu powinno być zrekuperowane i wykorzystane w innej fazie eksploatacji. Zarządzanie przepływami strumienia tego ciepła staje się w warunkach codziennej eksploatacji ważnym i trudnym zagadnieniem. Zagadnieniem tym trudniejszym, im silniej chce się je powiązać z minimalizacją zużycia paliwa i eksploatacyjnej emisji szkodliwych związków toksycznych.

Warto zauważyć, że w Politechnice Krakowskiej prace badawcze nad racjonalnym sterowaniem procesami chłodzenia i ogrzewania tłokowych silników spalinowych prowadzili wcześniej K. Golec (1987 r.), M. Brzeżański (2000-2011 r.), a kontynuował je Doktorant (2016-2018 r.). Adaptacja uzyskanej w tych badaniach wiedzy do hybrydowych spalinowych układów napędowych jest bardzo pożądana.

Uwzględniając powyższe konstatacje uważam, że problematyka podjęta w pracy jest aktualna, ciekawa i wskazuje na dalszy potencjał rozwojowy.

6.2. Istotność problematyki badawczej pod względem poznawczym i aplikacyjnym

Eksploatacja współczesnych układów napędowych pojazdów samochodowych i maszyn roboczych cechuje się dużą zmiennością obciążeń i dynamiką ich zmiany. Niestacjonarny charakter warunków operacyjnych prowadzi do ogromnych trudności w doborze najkorzystniejszych parametrów regulacyjnych pozwalających na uzyskanie największej sprawności prze-

tworzenia energii pierwotnej przy jednoczesnym minimalizowaniu emisji toksycznych produktów spalania. Logicznie rzecz biorąc: istnieje możliwość albo przenoszenia punktów obciążenia układu napędowego w zakresy najbardziej pod tym względem korzystne, albo poprawa ich efektywności energetycznej i ekologicznej w najczęściej wykorzystywanych obszarach operacyjnych.

Stosowanie hybrydowych układów napędowych wykorzystujących tłokowy silnik spalinowy umożliwia połączenie obu tych możliwości. Z jednej strony silnik spalinowy może pracować w warunkach największej sprawności cieplnej, a wytwarzana energia napędowa może być częściowo wykorzystana do napędu pojazdu, i częściowo do przetwarzania na energię elektryczną gromadzoną w układach akumulatorowych. Z drugiej strony do napędu pojazdu przy małych obciążeniach można wówczas wykorzystać wcześniej zgromadzoną energię elektryczną, wyłączając pracę silnika spalinowego. Praktyczna realizacja takiego – wydaje się optymalnego schematu – wymaga zapewnienia bardzo sprawnego i dynamicznego zarządzania przepływem energii oraz ciepła procesowego w całym systemie napędowym.

Udoskonalanie istniejących systemów zarządzania przepływem energii w spalinowych hybrydowych układach napędowych wymaga precyzyjnego rozpoznania specyfiki ich pracy w różnych, dynamicznie zmiennych warunkach operacyjnych, a następnie poszukiwania rozwiązań najbardziej efektywnych i skutecznych ze względu na zużycie energii pierwotnej oraz emisję szkodliwych składników spalin. Takim zagadnieniem została poświęcona ta praca, w pełni odpowiada więc aktualnym potrzebom poznawczym. Mimo coraz silniej rozpowszechniającym się elektrycznym układom napędowym można sądzić, że spalinowe układy hybrydowe będą jeszcze przez wiele lat stanowiły bardzo ważny segment rynku motoryzacyjnego; w związku z tym sądzę, że oceniana praca niesie w sobie także znaczny potencjał aplikacyjny.

W związku z przytoczonymi tutaj argumentami podjęcie problematyki zarządzania przepływem ciepła (energii) w hybrydowych spalinowych układach napędowych i jego racjonalizacji wydaje mi się w pełni uzasadnione i celowe.

6.3. Sformułowanie problemu, celu pracy i tez badawczych

W rozdziale 3 (s. 28-33) Autor formułuje koncepcję modernizacji układu chłodzenia w spalinowym hybrydowym układzie napędowym stwierdzając na wstępie, że „dotychczas znane zastosowania akumulatorów ciepła... nie rozwiązują problemów związanych z odpowiednim doбором jego parametrów oraz konfiguracją i algorytmem sterowania...” (s. 28, w. 1-2). Wskazuje dalej na problem czasu przepływu ilości ciepła odpowiedniej do rozruchu silnika spalinowego, a także na problem koniecznej pojemności cieplnej akumulatora. Autor wskazuje także na celowość zastosowania dodatkowego wymiennika ciepła umożliwiającego poprawienie bilansu ciepła, jednak pod warunkiem odpowiedniego nim sterowania, szczególnie w niestabilnych warunkach operacyjnych. Zatem istota jego pracy polegała na modyfikacji seryjnego układu chłodzenia przez wprowadzenie dodatkowego wymiennika ciepła oraz opracowaniu odpowiedniego algorytmu sterowania przepływem ciepła.

W tym miejscu (s. 29, 3. akapit) Autor napisał: „...rozwiązanie problematyki...”; raczej można rozwiązać zagadnienie lub problem, zaś problematyka ma znaczenie ogólniejsze, jako „ogół zagadnień należących do jakiejś dziedziny”. Podobne wątpliwości dotyczą tytułu podrozdziału 2.1 we Wprowadzeniu, gdzie mówi się o „problematyce zagadnienia warunków termicznych...”. Dodatkowo, co oznacza „zagadnienia warunków termicznych”? Brakuje tutaj odniesienia do jakiejś zależności lub związków, bo same „warunki” utożsamia się ze zbiorem wartości określonych parametrów i wskaźników.

Rozwiązując problem gromadzenia ciepła w układzie wybrano akumulator z przemianą fazową w postaci walca wypełnionego materiałem czynnym, który umieszczono w układzie wylotowym za „katalizatorem spalin” (s. 31, 1. akapit). Tutaj powinno być raczej: „za reaktorem

katalitycznym”. Warto chyba wspomnieć jeszcze, dlaczego umieszczono go za, a nie przed reaktorem katalitycznym.

Autor zatytułował rozdz. 3 (s. 28-33) „Koncepcja modernizacji układu chłodzenia silnika spalinowego w hybrydowym układzie napędowym”. Wydaje się, że bardziej właściwe byłoby odwrócenie kolejności rozdziałów 3 i 4, gdyż najpierw należy zidentyfikować problem badawczy, jednoznacznie go sformułować, ewentualnie sformułować także tezy lub hipotezy robocze, a następnie wybrać sposób realizacji celu pracy, czyli rozwiązania problemu badawczego. W rozdziale 3 właśnie wskazano, w jaki sposób Autor zdecydował rozwiązać problem skrócenia czasu wstępnego nagrzewania silnika spalinowego w układzie hybrydowym i sformułował koncepcję modernizacji układu chłodzenia.

W rozdziale 4 (s. 34-36) Autor sformułował naukowy cel badawczy oraz tezy pracy. Jako istotę swojej pracy określił opracowanie metody skrócenia czasu wstępnego nagrzewania silnika spalinowego pracującego w układzie hybrydowym (s. 34). Do realizacji tego zadania wykorzystał akumulator ciepła w postaci dodatkowego wymiennika ‘gazy wylotowe – ciecz chłodząca’. Akumulator ten ma pełnić też funkcję stabilizatora temperatury procesowej w zmiennych warunkach eksploatacji.

Autor przyjął tezę, że modyfikacja układu chłodzenia w hybrydowym układzie napędowym oraz opracowanie odpowiedniego algorytmu sterowania przepływem ciepła, pozwala skrócić fazę nagrzewania silnika spalinowego oraz wprowadzić jego stabilizację termiczną, zwłaszcza w warunkach ruchu miejskiego.

Nasuwa się tutaj uwaga logiczna: samo opracowanie algorytmu nie pozwala skrócić fazy nagrzewania, ale zastosowanie nowo opracowanego algorytmu pewno już tak. Ponadto: „wprowadzić stabilizację termiczną” – chyba lepiej zastąpić przez: „uzyskać stabilizację...”.

7. Struktura pracy i ocena jej poprawności metodologicznej

Dla realizacji celu badawczego Autor przyjął dwuetapowy tryb postępowania. Najpierw opracował model matematyczny i przeprowadził obliczeniowy dobór parametrów akumulatora ciepła do przyjętego układu napędu hybrydowego. Następnie przeprowadził badania drogowe potwierdzające celowość przeprowadzonej modernizacji układu chłodzenia/akumulacji ciepła.

W podrozdziale 4.2 Autor przedstawił kolejność podejmowanych dalszych czynności dla realizacji przyjętego celu pracy; wymieniono 14 punktów (a...n, s. 35). Uwzględniają one m.in.: syntezę stanu wiedzy, wskazanie stanu niewiedzy w wybranym obszarze badawczym, sformułowania problemu i tezy pracy, przyjęcie sposobu rozwiązania problemu i osiągnięcia założonego celu pracy. Badania postanowił Autor wykonać kilku etapowo: najpierw opracować model zmodernizowanego układu chłodzenia i – na podstawie analizy wyników badań symulacyjnych – przeprowadzić dobór najważniejszych cech i parametrów układu, głównie akumulatora ciepła. Następnie podjął wstępne badania eksperymentalne wykorzystane do opracowania algorytmu sterowania obiegiem cieczy chłodzącej, który następnie został zweryfikowany w trakcie badań drogowych na obiekcie rzeczywistym.

W zakończeniu rozdziału 4 (s. 36, ostatni akapit) Autor podsumował metodykę realizacji pracy, jednak sformułował ten opis w sposób bardzo ogólnikowy, np.: „... przeprowadzone pomiary i analizy teoretyczne...” (czego?), „przeprowadzono szereg symulacji...” (szereg? czego?), „dobór wybranych parametrów...” (jakich?). Wprawdzie te wątpliwości wyjaśniają się w dalszej lekturze, ale w tym miejscu można je było rozstrzygnąć nieco precyzyjniej.

Przyjęty schemat postępowania jest kompletny i pod względem metodologicznym jest odpowiedni dla przyjmowanych standardów oraz zasad logicznego postępowania. Kompletność tę należy ocenić bardzo dobrze, gdyż zawiera wszystkie niezbędne elementy: syntezę wiedzy źródłowej, sformułowanie problemu, spójną koncepcję badawczą zawierającą zarówno badania modelowe, symulacyjne, jak i badania eksperymentalne, stanowiskowe i drogowe. Wskazują

one na dobre przygotowanie Autora jako naukowego badacza w dziedzinie nauk stosowanych, technicznych.

8. Analiza części badawczej rozprawy

Już w rozdziale 2 (Wprowadzenie) przytoczony został wykres zmian obciążenia silnika spalinowego dla pojazdu poruszającego się w ruchu miejskim. Autor zwrócił tutaj uwagę na średni poziom obciążenia silnika spalinowego (25,2%, s. 11), zapomniał jednak wskazać na niestacjonarny charakter takiego obciążenia i wynikające z niego konsekwencje dla warunków pracy układu hybrydowego. Oczekiwałbym tutaj oszacowania szybkości zmian obciążenia i prędkości obrotowej silnika, żeby wskazać też na oczekiwania odnośnie szybkości reakcji układu chłodzenia oraz jego systemu sterującego, który jest przedmiotem badań w dalszej części pracy.

Na marginesie chcę zauważyć, że praca ma rozdział 1. Wstęp, a rozdział 2 ma tytuł Wprowadzenie, ale zwykle oba te wyrazy traktowane są jako synonimy. Rozdział 2 powinien raczej być zatytułowany: „Aktualna wiedza na temat stosowania akumulatora ciepła w napędzie hybrydowym” lub podobnie, a jego funkcja w metodologicznej strukturze pracy naukowej polega na syntezie dotychczasowej wiedzy w zakresie objętym problematyką pracy.

Rozdział 5 Autor poświęcił omówieniu badań modelowych układu chłodzenia z dodatkowym akumulatorem ciepła zastosowanym w hybrydowym układzie napędowym pojazdu. Zwrócił uwagę, że w badanym przypadku i przy tak sformułowanym problemie poznawczym najważniejszym elementem układu jest akumulator ciepła. Dla wybranego przez siebie obiektu dalszych badań drogowych opracował model fizyczny, który opisał zależnościami matematycznymi wykorzystanymi następnie w modelu symulacyjnym. W opisie bilansu sił uwzględnił siły: oporów toczenia, oporów powietrza, oporów wzniesienia oraz bezwładności mas poruszających się ruchem posuwistym i obrotowym. System użytych równań, które tworzą model obliczeniowy, zestawiono na s. 39. Wyniki obliczeń według tych równań zobrazowano na rysunkach 5.4-5.7. W komentarzu do nich na s. 42 Autor napisał, że przedstawiają przebiegi czasowe mocy oporów ruchu pojazdu (powietrza, bezwładności, toczenia) w czasie symulacji 0-4 min., do osiągnięcia dopuszczalnego rozładowania akumulatorów elektrochemicznych. Niestety, nie znalazłem dokładniejszego komentarza, co z tych przebiegów wynika, po co były one potrzebne i do czego dalej wykorzystane. Nasuwa się także pytanie, co oznacza pojęcie „czas symulacji”? Czy jest to czas „pracy” komputera, czy raczej czas trwania procesu objęty analizą symulacyjną? Podobne pytanie pojawia się w odniesieniu do rys. 5.16.

Na stronie następnej Autor podsumowuje moc oporów ruchu pojazdu porównuje je z ilością energii elektrycznej wynikającej z pojemności elektrycznych akumulatorów trakcyjnych i na tej podstawie określa graniczny czas nagrzewania silnika spalinowego do jego uruchomienia po wyczerpaniu zasobów energii elektrycznej. W tym miejscu wskazane było podanie wartości liczbowych, które wynikają z interpretacji przedstawionych wykresów oraz wyraźniejsze sformułowanie wniosków z tego etapu analizy wyników symulacji.

Na s. 46 (2. ak.) napisano: „W niniejszym opracowaniu zastosowano stal austenityczną...” – niewłaściwy skrót myślowy, gdyż stal nie jest stosowana w opracowaniu a do skonstruowania elementów akumulatora ciepła.

W pierwszym etapie obliczeń Autor wyznaczył ilość ciepła niezbędnego do podgrzania silnika spalinowego wykorzystując znajomość masy oraz ciepła właściwego materiału głównych, chłodzonych części konstrukcyjnych silnika (s. 48-49). Następnie wyznaczył ilość ciepła rozpraszanego do otoczenia. Pojawia się tutaj zdanie, że „Ruch powietrza w przestrzeni silnika zależy od prędkości...”; chodzi tutaj o ruch w przestrzeni komory silnika. Wyniki obliczeń Autor zweryfikował na podstawie dodatkowych testów drogowych.

Obliczając strumień ciepła przekazywanego od substancji czynnej akumulatora do cieczy chłodzącej Autor zastosował wzór Pecleta (s. 56, 2-3 ak. od g.). Może warto w tym miejscu wyjaśnić (choćby w przypisie), kiedy stosuje się wzór Pecleta, a kiedy Newtona?

Kilkakrotnie Autor utożsamia symulowany czas trwania procesu z „czasem symulacji”, co może być niewłaściwie interpretowane. Na s. 61, 1. akap. Napisano: „czas badania symulacyjnego ustalono na 225 s...”, a chodzi chyba o czas trwania symulowanego procesu. Dalej pojawia się sformułowanie: „zapisane dane symulacji zostały użyte do dalszych obliczeń”, jednak nie jest wyjaśnione które dane i do obliczeń czego, jakich innych parametrów lub wskaźników.

Dość ważnym brakiem pracy jest powtarzająca się sytuacja przytaczania rysunków przedstawiających przebiegi czasowe zmian różnych wskaźników operacyjnych, jednak bez wyraźnego wskazania, dlaczego są one potrzebne i co z nich wynika. Każda ilustracja w toku wyводу naukowego powinna służyć wskazaniu jakiś istotnych cech mierzonego/obserwowanego wskaźnika w celu wykrycia ewentualnych zmian, jej dynamiki, ewentualnych nieciągłości w przebiegu itp. W rezultacie przyjętej przez Autora konwencji czytelnik patrzy na wykresu, ale nie bardzo wie po co i co z tego wynika do dalszego toku wywodów. Co na przykład jest istotne na rysunku 5.15? Autor powinien chyba odpowiedzieć czytelnikowi, na co powinien zwrócić szczególną uwagę.

Rozdział 6 został poświęcony rozważaniom na temat sterowania przepływem ciepła w układzie chłodzenia/akumulacji. Rozdział ten rozpoczyna się niestety tzw. „wiszącym” tekstem. Warto pamiętać, że dzieląc całość (tutaj: rozdział) na kilka części, nie należy zostawiać jakiejś części niepodzielonej, nie przyporządkowanej do jakiegoś podrozdziału. Początek podrozdziału 6.2 ma także charakter tekstu „wiszącego”. Podobna sytuacja występuje w podrozdziale 7.3.

Przedstawiony na rys. 6.3 schemat blokowy oprogramowania LabView jest nie tylko trudno czytelny, ale – co ważniejsze – nie wiadomo, co Autor chciał tym wykazać. Jeżeli taki schemat nie ma dołączonego komentarza, to może powinien zostać umieszczony w załączniku do pracy? Ilustracje w pracy, szczególnie naukowej, powinny być silnie powiązane z tekstem, z niego wynikać i służyć do uzasadnienia kolejnych wywodów. Tutaj tego brakuje.

Brakuje tego także na s. 72 odnośnie rys. 6.4, gdzie odczuwa się to tym bardziej, że przedstawiany tam algorytm sterowania stanowi istotny element nowości prezentowanej koncepcji układu chłodzenia, powinny zatem być mocno podkreślone jego cechy szczególne.

Na rys. 6.5 zatytułowanym „Histereza temperaturowa” widać zależność wskaźnika ΔT_1 od temperatury otoczenia. Autor pisze, że „wartość histerezy... to wyznaczona... wartość różnicy temperatury nagrzewania wstępnego silnika spalinowego” – ale różnicy między czym, a czym? Między temperaturą nagrzewania i chłodzenia?

Niestety, rozdział 6 kończy się dość nagle; brakuje jego podsumowania i uzasadnienia dla kontynuacji badań w ramach eksperymentów stanowiskowych i drogowych.

W rozdziale 7 Autor omówił zbudowane przez siebie stanowisko laboratoryjne do badań eksperymentalnych akumulatora ciepła wypełnionego ciekłym materiałem czynnym oraz zastosowaną aparaturę pomiarową. Omówił przebieg pomiarów oraz wykreślnie przedstawił przebieg zmian strumienia ciepła w czasie pomiarów (rys. 7.4).

Pod koniec rozdziału 7.2 (s. 84) Autor przeprowadził porównanie strumienia ciepła oddawanego do cieczy chłodzącej przez akumulator ciepła określonego na podstawie badań symulacyjnych i badań doświadczalnych uzyskując ich zadowalającą zbieżność (<5%).

Potwierdzając przydatność opracowanego akumulatora ciepła Autor zamontował go w pojeździe badawczym Toyocie Yaris oraz przeprowadził badania drogowe poprawności jego funkcjonowania wraz z algorytmem sterującym w różnych warunkach otoczenia (-10...+10°C). Badania wykonano na takiej samej trasie, jak w badaniach wstępnych (s. 85), choć stopień „podobieństwa” nie został określony jakimś wskaźnikiem, co byłoby wskazane, gdyż o otrzy-

mywanych wynikach decyduje nie tylko sama trasa, ale również sposób jej przebycia. Ponieważ rejestrowano parametry ze sterownika hybrydowego układu napędowego (EOBD, s. 86), to wydaje się, że taka ocena była możliwa.

Badania zmodernizowanego układu chłodzenia przeprowadzono w warunkach wstępnego nagrzewania (podrozdział 7.3.1, s. 86) oraz dogrzewania silnika podczas przerw w jego pracy (podrozdział 7.3.2, s. 92). Badania przeprowadzono w warunkach ruchu miejskiego (pojazd nie przekraczał prędkości jazdy 50 km/h) rejestrując jako parametr kontrolny temperaturę cieczy chłodzącej w głowicy silnika spalinowego. Próby prowadzono do chwili rozładowania akumulatora trakcyjnego i uruchomienia silnika spalinowego lub do osiągnięcia założonego czasu nagrzewania wstępnego (s. 86). Wyniki pomiarów temperatury cieczy chłodzącej w funkcji czasu trwania pomiarów przedstawiono na kolejnych wykresach 7.7 ... 7.11 dla temperatury otoczenia: -10, -5, 0, 5, 10°C. Zwraca uwagę, że wyniki pomiarów wskazują mniejsze temperatury w czasie całego procesu niż wyniki symulacji, a jej wartości na końcu procesu nagrzewania różnią się o 2-4°C (ok. 6-7%, Autor szacuje na 3-6%, s. 92). Oczekiwany tutaj byłby komentarz.

Uzyskane wyniki wykazują mniejsze temperatury cieczy chłodzącej w trakcie badań, niż w symulacji komputerowej. Ponadto Autor stwierdził, że uzyskane wyniki świadczą o poprawności doboru akumulatora ciepła oraz metodologii nagrzewania wstępnego (s. 92), gdyż różnice wartości wynoszą zaledwie 3-6%.

W podrozdziale 7.3.2 przedstawiono wyniki pomiarów temperatury cieczy chłodzącej w głowicy silnika spalinowego w warunkach jazdy miejskiej. Nieustalony i przerywany charakter jazdy i pracy silnika powoduje zwiększenie strat ciepła do toczenia i wpływa na stopień naładowania akumulatora (SNB, s. 93).

Na kolejnych wykresach 7.12-7.14 przedstawiono przebiegi zmian obciążenia silnika, temperatury cieczy w głowicy i wartości wskaźnika SNB w trakcie trwania próby drogowej, kolejno, dla temperatury otoczenia -10, 0, +10°C. Końcowe wyniki zestawiono w tabl. 10 (s. 97), a wykreślnie przedstawiono je na rysunkach 7.15-7.17. Wynika z nich, że temperatury cieczy chłodzącej w głowicy silnika spalinowego ze zmodyfikowanym układem chłodzenia jest znacznie bardziej stabilna niż w układzie seryjnym i ma wyższe wartości na końcu procesu pomiarowego. Uzyskano też istotnie większe wartości, co wskazuje na znaczącą poprawę stabilności temperaturowej całego układu. Przyspieszenie ładowania akumulatora ciepła pozwala na zwiększenie względnego czasu pracy pojazdu na silniku elektrycznym, zmniejszając zużycie paliwa i emisję związków toksycznych, na co wskazuje Autor w zakończeniu tego rozdziału (s. 100).

Rozdział 8 Autor przeznaczył na omówienie błędów pomiarów. Nie było chyba jednak potrzebne przytaczanie pełnego opisu podstaw wyznaczania błędów pomiarów, tak jak to zrobiono w podrozdziale 8.1 i 8.2 (s. 101-102), gdyż kwestie te są znane z podręczników. Istotniejsze było odniesienie tych procedur do pomiarów wykonanych w ramach pracy, co zrobiono w podrozdziale 8.3. W tablicy 11 wskazano na maksymalny błąd pomiaru strumienia objętości przepływu czynnika chłodzonego i temperatury na wejściu i wyjściu z akumulatora. Oczywiście słusznie, lecz z takiego przytoczenia wartości jeszcze nic nie wynika; Autor powinien w tym miejscu wskazać jakiś wniosek odnoszący się do prawidłowości i poprawności wyników pomiarów. Przytoczone na rysunkach 8.1 i 8.2 wartości strumienia ciepła zmierzonych (8.1) i symulowanego (8.2) wraz z przedziałem $+\Delta q$ i $-\Delta q$ niczego nie wyjaśniają, dopóki nie zostaną porównane ze sobą i zakresami błędów badania. Dlatego na s. 106 bardzo brakuje wskazania stosunku Autora do tych przedstawionych wcześniej porównań.

Wnioski z pracy przedstawiono w rozdziale 9. Jako pierwszy wniosek sformułowano stwierdzenie, że główna teza pracy została udowodniona, gdyż zaproponowana modyfikacja układu chłodzenia w hybrydowym układzie napędowym oraz opracowanie odpowiedniego algorytmu sterowania przepływem ciepła pozwala skrócić fazę nagrzewania silnika spalinowego oraz wprowadzić jego stabilizację termiczną. Nasuwa się tutaj kilka uwag. Po pierwsze ostateczne

efekty daje zastosowanie algorytmu, a nie samo jego opracowanie. Po drugie – „pozwała skrócić fazę nagrzewania...”, ale o ile sekund lub – lepiej – procent? Po trzecie: „wprowadzić”, czy „uzyskać” lub „poprawić”; wskazane tutaj jest wyrażenie tej poprawy odpowiednim wskaźnikiem liczbowym. W pracach aplikacyjnych potwierdzenie ilościowe osiągniętych rezultatów jest cenne, gdyż pozwala wyrobić sobie pogląd, na ile ewentualny nakład konstrukcyjny może być przydatny w innych zastosowaniach. Po czwarte wreszcie: wniosek podsumowujący całość pracy jest wnioskiem syntetycznym, poprzedzającym wnioski szczegółowe. Ja uważam, że bardziej właściwe jest odwrócenie narracji: najpierw wnioski szczegółowe, a na końcu wniosek podsumowujący. Jest to jedynie sugestia, a nie zarzut.

W kolejnych wnioskach Autor potwierdził celowość przeprowadzenia badań rozpoznawczych, skrócenie czasu nagrzewania silnika dzięki prawidłowemu doborowi parametrów akumulatora ciepła i odpowiedniego nim sterowania. Potwierdzono także przydatność badań drogowych do weryfikacji poprawności opracowanego modelu symulacyjnego, ale stwierdzono przy tym celowość dalszych badań nad wprowadzenie przewodu obojętnego akumulatora dla gazów spalinowych.

Nie w pełni rozumiem sformułowania wniosku 9 dotyczącego histerezy temperaturowych i będę prosić Autora o bardziej szczegółowe wyjaśnienie w trakcie obrony rozprawy.

W rozdziale 10 przedstawiono Podsumowanie i propozycje dalszych badań. Autor wskazał na możliwość i przedstawił praktyczny sposób wykorzystania zmagazynowanej energii cieplnej do nagrzewania wstępnego silnika spalinowego („wykonanie nagrzewania...”, s. 110, w. 7 od g. – błąd stylistyczny i logiczny). Potwierdził także poprawność i przydatność opracowanego programu symulacyjnego. Dalej wskazał na konieczność wykorzystywanych histerezy temperaturowych, co wymaga dodatkowego komentarza w kontekście uwagi w akapicie wcześniejszym tej opinii.

Podsumowanie Autor zakończył kilkoma sugestiami dotyczącymi kierunku i zakresu kontynuowania badań w przyszłości.

9. Uwagi szczegółowe dotyczące redakcji pracy

Przedstawiona do oceny praca jest kompletna, gdyż zawiera wszystkie niezbędne elementy: Streszczenie, *Abstract*, spis oznaczeń i skrótów oraz bibliografię; brak jest spisu rysunków i tabel, ale nie jest to brak istotny. Tekst jest bogato ilustrowany, a wykorzystane rysunki (prawie wszystkie) są opracowane przejrzysto, a umieszczone na nich wielkości są wyjaśnione.

Nie stwierdziłem żadnych istotnych błędów językowych, składniowych ani literowych. Pochwały wymaga konsekwentna i bardzo uważna redakcja całości pracy oraz opracowanie jej strony graficznej, choć pewne zastrzeżenia budzi umieszczanie tytułów na wykresach, nie zawsze zgodnych z podpisem (por. dalej).

W trakcie analizy treści rozprawy dostrzegłem pewne nieliczne braki lub niekonsekwencje redakcyjne. Oto kilka z nich:

- na s. 11, w. 1 napisano: „W prezentowanym... wynikach...” – poprawić na „prezentowanych”;
- na rys. 2.6 podpis i legenda nie są zgodne: „temperatura cieczy chłodzącej” – „temperatura silnika”;
- w wyliczance na s. 32 stosuje się a., b., ... – po kropce należy pisać wielką literę; w tym przypadku lepiej by było: a), b), ..., tak jak na s. 35;
- s. 34, 4. w. od d.: jest: „posłużą” – winno być: „posłużyły”; rozprawa stanowi omówienie prac już wykonanych, a nie planowanych;
- pominięto znak mnożenia na s. 39, we wzorach 1, 3 i 4, także we wzorach 9 i 11 na s. 47, wz. 16, s. 50, wz. 20, s. 55, wz. 23 i 24, s. 56, wz. 28, 29, s. 60, wz. 30, s. 61, wz. 32, s. 63; w innych wzorach jest stosowany;

- znak łącznika (dywiz) stosuje się często zamiast myślnika, np. podpis rys. 2.5-2.9, s. 29 4x, s. 39 wielokrotnie, s. 40, w. 4 od g., s. 41, 2. ak., s. 45, w. 8 od d., s. 49 7x, s. 50 4x, s. 53/54 raz tak, raz inaczej, s. 55/56 4x, s. 57 3x, s. 69;
- na s. 39, w. 10 od g. „nrom” zamiast „norm”;
- akapity nie zawsze są pisane z wcięciem akapitowym, np. s. 32, 36, 40, 41, 51, 55, 57, 57, 60, 77, 78, itp.;
- s. 40, 2. akapit: niezręczne sformułowanie: „schemat blokowy... zawiera rysunek” – raczej: „pokazuje”, „przedstawia”;
- wielokrotnie powtarza się umieszczenie tytułu wykresu tożsamego z podpisem pod rysunkiem, co stanowi zbędne powtórzenie (rys. 2.5-2.12, 5.4-5.9, 5.12-5.14, 5.16, 6.5, 7.4, 7.5, 7.7, 7.11 itd.), rys. 5.8, 5.9, 7.4, 7.5 – tytuł i podpis nie są zgodne, ;
- w opisie osi wielu wykresów nie zawsze stosowana jest jednakowa liczba miejsc znaczących;
- zbyt częste stosowanie przyimka „poprzez” zamiast „przez” (np. s. 45, 46, 47, 63); Wielki słownik poprawnej polszczyzny również podaje, że forma „poprzez” jest obecnie nadużywana;
- s. 51, w.2 od d. – usunąć słowo „ona”;
- s. 58, w. 6-7 od g.: „...rozwiązanie analityczne jest skomplikowane, co prowadzi do uzasadnionego użycia narzędzi symulacyjnych” – a nie prościej byłoby „...co uzasadnia wykorzystanie symulacji”?
- na s. 59, w. 5 od d. – „Wyloty cieczy z węzownic do badań symulacyjnych...”; oczywiście, ciecz nie wlatuje do badań...;
- s. 79, 1. W. od g.: „dokładne wartości skutków...” – wartości? chyba lepiej „dokładna ocena skutków”;
- s. 79. W. 5 od g. „... ma umożliwić...” – dysertacja jest sprawozdaniem z wykonanych badań, więc należy stosować czas przeszły dokonany; dotyczy to też słowa „posłużą” na s. 86, w. 1 od g.;
- na rys. 7.13 brak opisu linii zielonej (SNB);

Wymienione powyżej uwagi dotyczą braków lub błędów edytorskich i nie mają istotnego wpływu na wartość naukową rozprawy.

W trakcie studiowania treści rozprawy, szczególnie części dotyczącej omówienia wyników badań modelowych i eksperymentalnych, nasuwa się uwaga ogólna: Autor omawia zmiany wartości obserwowanych wskaźników, ale nie zawsze pojawia się wyjaśnienie, dlaczego tak się dzieje i jakie są konsekwencje procesowe obserwowanych zmian, co wskazałem już wcześniej. Tworzy się zatem wrażenie pewnych niedostatków myślenia typu przyczynowo-skutkowego i szerszych uwarunkowań obserwowanych zmian wskaźników. Prowadzi to czasem do spływania procesu wnioskowania i ograniczania go do opisu zarejestrowanych obserwacji zjawiska lub procesu.

10. Najważniejsze osiągnięcia pracy

Do najważniejszych osiągnięć pracy można według mnie zaliczyć przeprowadzenie analizy celowości zastosowania dodatkowego akumulatora ciepła w układzie chłodzenia hybrydowego napędu spalinowego. Autor taki akumulator skonstruował, zastosował i potwierdził prawidłowość funkcjonowania. Dodatkowo opracowany został program symulacyjny i została zweryfikowana poprawność uzyskiwanych w ten sposób wyników.

Bardzo cenne jest także opracowanie i zweryfikowanie poprawności działania algorytmu sterowania takim złożonym układem chłodzenia.

11. Podsumowanie oceny

Przedstawiona do oceny rozprawa stanowi opracowanie zawierające wszystkie niezbędne elementy naukowej pracy badawczej. Zawarto w niej omówienie procedury badawczej oryginalnego, opracowanego i wykonanego przez Autora złożonego układu chłodzenia silnika spalinowego pracującego w hybrydowym układzie napędowym.

Doktorant zdefiniował zagadnienie badawcze na podstawie syntezy literatury przedmiotu i badan wstępnych, przyjął odpowiednią jego zdaniem drogę postępowania dla wyjaśnienia tego problemu i udowodnienia postawionej tezy. Zbudował i dostosował do swoich eksperymentów stanowisko badawcze złożone z nowoczesnych urządzeń i elementów pomiarowych odpowiadających obowiązującemu standardowi, następnie przeprowadził badania optyczne dla różnych parametrów badawczych oraz przeprowadził interpretację wyników.

Autor przeprowadził również syntezę wiedzy na temat matematycznego modelowania procesów wymiany ciepła w silniku spalinowym i wymienniku ciepła. Wiedzę swoją wykorzystał do opracowania własnego modelu symulacyjnego układu chłodzenia silnika spalinowego z dodatkowym akumulatorem ciepła wykorzystującego ciepło przemiany fazowej, a następnie swój model skalibrował i zweryfikował w oparciu o zebrane wyniki badań eksperymentalnych praktycznie udowodniając i wykorzystując swoją wiedzę teoretyczną; w ten sposób spełnił wymagania dotyczące samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

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 rozwiązał problem naukowy polegający na krytycznej badawczej ocenie możliwości i korzyści wynikających z modyfikacji układu chłodzenia hybrydowego napędu spalinowego przez zastosowanie dodatkowego akumulatora ciepła i specjalnie dobranego algorytmu sterowania przepływem ciepła. Tym samym spełnił wymagania zapisane w Ustawie, w art. 187, pkt. 2.

12. Wniosek końcowy

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. Tomasza Kosztyle pt.: *Opracowanie system nagrzewania silniki spalinowego z hybrydowym układem napędowym przy zastosowaniu akumulatora ciepła* 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