

Prof. dr hab. inż. Marek BRZEŻAŃSKI
Katedra Pojazdów Samochodowych
Wydział Mechaniczny
Politechniki Krakowskiej

RECENZJA
Rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Łukasza Ziółkowskiego pt.

**„ANALIZA ENERGETYCZNA UKŁADU KOGENERACYJNEGO
Z SILNIKIEM ZI W ZAKRESIE ZMIENNYCH PARAMETRÓW REGULACYJNYCH”**

Promotor: Dr hab. inż. Grzegorz Przybyła, prof. Politechniki Śląskiej
Promotor pomocniczy: Dr hab. inż. Adrian Nocoń, prof. Politechniki Śląskiej

Podstawa opracowania recenzji:

Pismo Prof. dr. hab. inż. Andrzeja Rusina, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z dnia 19.07.2023 r., do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej.

WYBÓR TEMATYKI ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Oszczędność energii jest obecnie priorytetem we wszystkich obszarach gospodarki. Wynika to z postępów światowej transformacji energetycznej, która zmierza do uniezależnienia się od energetycznych surowców kopalnych i uzyskania neutralności środowiskowej. Tym niemniej większość eksploatowanych urządzeń energetycznych korzysta nadal z tradycyjnych nośników energii, których stosowanie generuje znaczne straty, a ponadto obciąża środowisko emisją toksycznych substancji. Do grupy tego typu urządzeń energetycznych należą także różnego typu agregaty prądotwórcze, najczęściej korzystające z napędu tłokowym silnikiem spalinowym, zasilanym paliwami węglowodorowymi. Silniki tego typu stanowią nadal podstawowe źródło napędu nowych, stale produkowanych agregatów prądotwórczych, a także innych maszyn przemysłowych, a w trakcie eksploatacji są tysiące tego typu urządzeń, które będą użytkowane przez najbliższe dziesięciolecia. W związku z tym ta grupa tłokowych silników spalinowych nadal podlega rozwojowi technicznemu, ponieważ obecnie w tym sektorze nie istnieją jeszcze realne możliwości ich zastąpienia innymi, bardziej ekologicznymi źródłami napędu. Z tego powodu wszelkie prace dotyczące zwiększenia sprawności przetwarzania energii w tych silnikach i zmniejszenie oddziaływania ich na środowisko są niezwykle pożyteczne.

Tego typu działania podjął w swojej pracy Doktorant, proponując modyfikację stosowanych systemów regulacji tłokowych silników spalinowych, czego efektem ma być zwiększenie sprawności wytwarzania energii w małych agregatach prądotwórczych oraz zmniejszenie emisji toksycznych składników spalin.

Podjęta tematyka dysertacji, dotycząca zwiększania sprawności przetwarzania energii w silniku spalinowym, metodą regulacji wybranych parametrów, nie jest wprawdzie nowa, ale zaprezentowana przez Autora koncepcja nosi cechy nowości. Należy także podkreślić, że z naukowego i praktycznego punktu widzenia wszelkie próby zwiększania sprawności

przemian energetycznych to nadal aktualny i ważny problem badawczy, a prace naukowe w tym obszarze wiedzy zasługują na duże uznanie. Z tego względu podjęta przez Autora rozprawa próba naukowego uzasadnienia zaproponowanych zmian w regulacji mocy tłokowych silników spalinowych, stosowanych w agregatach prądotwórczych, świadczy o jego dobrym rozeznananiu w omawianej problematyce, mimo że zaprezentowany zakres pracy obejmuje tylko etap wstępnych badań doświadczalnych. Mając to na uwadze należy uznać, że tematyka podjęta przez Autora pracy jest w pełni uzasadniona zarówno pod względem naukowym, jaki praktycznym.

UKŁAD TREŚCI ROZPRAWY I SPOSÓB REALIZACJI PRACY

Rozprawa doktorska autorstwa Pana mgr. inż. Łukasza Ziółkowskiego nosi tytuł „**Analiza energetyczna układu kogeneracyjnego z silnikiem ZI w zakresie zmiennych parametrów regulacyjnych**”, który oddaje jej treść i jest zrozumiały nie tylko dla specjalistów z branży energetycznej i motoryzacyjnej. Jedyna uwaga dotyczy użycia skrótu ZI, ponieważ w tytułach zasadniczo stosuje się pełne nazwy.

Przedstawiona do recenzji praca jest dziełem, liczącym łącznie 150 stron wraz z rysunkami, tabelami, wzorami i załącznikami. Zasadnicza treść rozprawy licząca ok. 130 stron jest zawarta w sześciu rozdziałach.

We wprowadzeniu do tematu rozprawy zawarto krótki wstęp, uzasadniający podjęcie badań naukowych w temacie objętym tytułem rozprawy oraz przedstawiono cel, zakres oraz tezy pracy. Dopiero w rozdz. 2 poddano analizie stan wiedzy dotyczący obszaru badań, uzupełniony wynikami własnych badań rozpoznawczych, a w rozdz. 3 przedstawiono własną koncepcję regulacji obciążenia silnika spalinowego, która jest głównym przedmiotem prowadzonych badań naukowych oraz wyniki badań wstępnych.

W pracach doktorskich, zdefiniowanie naukowego celu prowadzonych badań oraz przedstawienie tezy pracy, następuje zwykle po opisanu stanu wiedzy i przedstawieniu koncepcji, która wnosi nowe wartości do obszaru prowadzonych badań naukowych. Niezbędnym uzupełnieniem jest przedstawienie kolejno: metodyki prowadzonych badań oraz planu realizacji pracy, opis warsztatu badawczego i zastosowanej aparatury.

Brak wymienionych elementów rozprawy lub ich dość przypadkowe umieszczenie w różnych rozdziałach, a także brak wyraźnie rozdzielonych dokonań Autora od istniejącej wiedzy, utrudnia analizę i ocenę treści pracy.

W pozostałych rozdziałach Doktorant prezentuje swoje dokonania, dotyczące budowy i badania prototypowego systemu kogeneracyjnego, w którym zastosowano silnik spalinowy, regulowany według koncepcji Autora. Niektóre z dokonań, opisanych w tej części pracy nie mają bezpośredniego związku z postawioną tezą i analizowanym naukowym problemem badawczym.

Rozkład treści poszczególnych rozdziałów jest charakterystyczny dla sprawozdań z badań przemysłowych i wskazuje na działanie podporządkowane głównie osiągnięciu celów użytecznych, natomiast w mniejszym stopniu na naukowe wyjaśnienie badanych zjawisk fizycznych.

Styl rozprawy jest poprawny, treść pracy jest dobrze zilustrowana rysunkami, a stosowana terminologia, poza nielicznymi wyjątkami, jest prawidłowa. Spis literatury wykorzystywanej w pracy obejmuje 105 pozycji, przy czym kolejność umieszczenia poszczególnych pozycji w zamieszczonym spisie jest dość przypadkowa i nie jest przyporządkowana dacie publikacji lub porządkowi alfabetycznemu. Są to głównie pozycje dotyczące badań naukowych prowadzonych w ośrodkach zagranicznych, natomiast brak jest krajowych pozycji, dotyczących analizowanych procesów silnikowych. Niektóre

z zamieszczonych pozycji literatury nie mają bezpośredniego związku z analizowanym problemem badawczym. Na pozostałych stronach rozprawy umieszczono wykaz ważniejszych symboli, skrótów i oznaczeń, spis tabel i rysunków a także streszczenie w języku angielskim i polskim.

OCENA MERYTORYCZNA ROZPRAWY

Podstawowym celem naukowym prac badawczych i rozwojowych, prowadzonych przez Pana mgr. inż. Łukasza Ziółkowskiego, było opracowanie własnej koncepcji systemu regulacji mocy w silniku o zapłonie iskrowym, stosowanym w agregacie prądotwórczym.

Zakres prowadzonych badań naukowych obejmował duży obszar techniki, związanej nie tylko z zagadnieniami teorii i konstrukcji silników spalinowych, lecz także z zagadnieniami współpracy silnika z maszyną elektryczną w agregacie prądotwórczym oraz zagadnieniami odzysku ciepła. W tym zakresie Doktorant przeprowadził szereg badań eksperymentalnych, a także numeryczne badania modelowe, dotyczące wyboru silnika spalinowego.

Podczas realizacji postawionych celów naukowych i użytkowych Doktorant poruszył kilka złożonych problemów badawczych.

Pierwszym z nich była analiza techniczna istniejących systemów regulacji mocy tłokowych silników spalinowych, a także zagadnienia emisji toksycznych składników spalin oraz współpracy silnika spalinowego z maszyną elektryczną w zespole agregatu. W tym zakresie Doktorant przeprowadził analizę teoretyczną istniejących systemów regulacji mocy silnika oraz wykonał wstępne badania doświadczalne, dotyczące pomiaru parametrów roboczych silnika i emisji toksycznych składników spalin.

Drugie, obszerne zagadnienie analizowane przez Doktoranta, dotyczyło wyboru odpowiedniej maszyny elektrycznej, spełniającej oczekiwania w zakresie otrzymywanych parametrów prądu elektrycznego.

Trzeci obszar analizy dotyczył zagadnień odzysku ciepła w zespole kogeneracyjnym. W tym przypadku Doktorant analizował możliwość odzysku ciepła z układu chłodzenia i smarowania silnika oraz ciepła unoszonego w strumieniu spalin.

Wymienione trzy obszary prac badawczych stanowią duże, odrębne wyzwania naukowe, wykraczające poza zakres recenzowanej pracy, a ich rozwiązanie wymaga często prowadzenia specjalistycznych, złożonych prac naukowych i stanowi bardzo trudne zadanie do realizacji w jednej pracy. Przedstawiona w rozprawie próba osiągnięcia postawionych celów wymagała od Doktoranta zarówno podstawowej wiedzy dotyczącej bezpośrednio zagadnień związanych z silnikami spalinowymi, pomiarami emisji, pomiarami elektrycznymi i cieplnymi, jak również interdyscyplinarnej wiedzy niezbędnej do zaplanowania i wykonania różnego typu badań doświadczalnych i symulacyjnych oraz wiedzy związanej z techniką komputerową.

Na tej podstawie można stwierdzić, że przeprowadzenie wielowątkowych analiz, symulacji i badań doświadczalnych, które były niezbędne do zrealizowania postawionych celów badawczych, a także samodzielne opracowanie otrzymanych wyników badań i umiejętność ich świadomego użycia w stworzeniu prototypowego układu kogeneracyjnego, świadczy o dojrzałości naukowej Doktoranta.

Uważam, że największa wartość prac analitycznych i badawczych przedstawionych w recenzowanej rozprawie dotyczy:

- Trafnego wyboru tematu rozprawy, dotyczącego oszczędności energii, który jest aktualny i ważny z punktu widzenia praktyki inżynierskiej,
- Podjęcia próby stworzenia nowej koncepcji systemu regulacji mocy silnika spalinowego, stanowiącego napęd agregatu prądotwórczego,

- Przeprowadzenia analizy problemów pomiarowych i badawczych, wynikających z założeń projektowych opracowanego systemu regulacji mocy silnika współpracującego z generatorem prądu elektrycznego. Składa się na to wiedza z zakresu teorii silników spalinowych oraz metod pomiarowych stosowanych w pomiarach silnikowych i pomiarach elektrycznych,
- Budowy stanowiska badawczego oraz przeprowadzenia wstępnych badań doświadczalnych, służących do pozyskania parametrów wejściowych, niezbędnych do budowy prototypowego urządzenia,
- Opracowanie koncepcji układu kogeneracyjnego według własnego pomysłu,
- Opracowania modelu numerycznego silnika spalinowego i wykonanie symulacji komputerowych, pozwalających na określenie jego parametrów, w aspekcie zastosowania w układzie kogeneracyjnym,
- Przeprowadzenie analizy doboru generatora energii elektrycznej,
- Opracowania koncepcji zagospodarowania odpadowego ciepła z silnika spalinowego,
- Przeprowadzenie obliczeń wymienników ciepła dla układu chłodzenia, smarowania oraz z układu wylotowego silnika,
- Przeprowadzenia kompleksowych badań opracowanego układu kogeneracyjnego,
- Sformułowania wniosków z przeprowadzonych prac modelowych i dalszych działań, dotyczących rozwoju opracowanego systemu.

Podczas realizacji rozprawy poruszono wiele różnych zagadnień dotyczących zarówno wiedzy specjalistycznej, związanej z teorią i konstrukcją silników spalinowych, działaniem systemów wytwarzania prądu elektrycznego, zagadnieniami wymiany ciepła i emisją toksycznych składników spalin. Niezbędna była tu interdyscyplinarna, ogólna wiedza techniczna Doktoranta, konieczna do powiązania ze sobą wielu analizowanych zjawisk. Z analizy prowadzonych przez Doktoranta badań naukowych można wywnioskować, że założone tezy rozprawy zostały zrealizowane. W związku z tym rozprawa jest dziełem wartościowym merytorycznie, a uzyskane wyniki mogą być przydatne w praktyce inżynierskiej.

Z tych względów przedstawioną rozprawę należy uznać za oryginalny dorobek naukowy Doktoranta, stanowiący wkład w dziedzinę nauki dotyczącą dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.

Analizując treść rozprawy nasuwają się pewne uwagi, które jednak nie umniejszają jej ogólnie pozytywnej wartości merytorycznej.

Generalna uwaga dotyczy zakresu realizowanej pracy oraz formy, w której została przedstawiona. Układ treści rozprawy jest bardziej zbliżony do sprawozdania z badań przemysłowych, niż do opracowania naukowego, przyjętego dla prac doktorskich. Wskazuje na to także przypis zawarty w rozprawie, z którego wynika, że większość badań wykorzystanych w rozprawie pochodzi z materiału badawczego uzyskanego z realizacji projektów, z udziałem Doktoranta. W mojej opinii, zakres ten obejmuje zbyt szeroki i zróżnicowany obszar wiedzy, co w przypadku realizacji pracy doktorskiej, utrudnia prawidłową analizę naukową poruszanych zagadnień.

Przykład stanowić może rozdz. 2, w którym niezbyt profesjonalnym językiem omówiono wybrane zagadnienia procesów silnikowych, w tym przeprowadzono dość powierzchowną analizę metod regulacji mocy silników ZI i ZS, które stanowią sedno realizowanej pracy. Innym tego typu przykładem jest opisany w rozdz. 3.2.1. problem spalania ubogiej mieszanki w silniku. W tym wypadku zabrakło głębszej analizy problemu, który wyczerpująco jest opisany w wielu klasycznych pozycjach literatury. Z kolei bez wyraźnego uzasadnienia Autor opisuje standardowe procedury, stosowane w pomiarach laboratoryjnych, jak np. w rozdz.

3.2.3. procedurę pomiaru prędkości obrotowej. Podobny charakter ma opis systemu zasilania, który był zastosowany w badanym silniku. Przedstawione w rozdz. 3.3.3. wyniki badań wstępnych są dość oczywiste, natomiast zabrakło ich należytej, naukowej interpretacji przez Autora pracy, szczególnie w kontekście stosowania opracowanej metody regulacji. W rozdziale 4.1.1. Autor przedstawił wyniki badań modelowych, których celem był dobór właściwego silnika do budowy agregatu kogeneracyjnego. Zastosowano tu prosty model, korzystający z bilansu energii i masy. Biorąc pod uwagę rodzaje paliwa, użyte do modelowania procesów, uwagę zwraca dobór parametrów regulacyjnych, w postaci przyjętych do obliczeń modelowych wartości kąta wyprzedzenia zapłonu oraz współczynnika nadmiaru powietrza. Wątpliwości budzi zwłaszcza zasadność modelowania pracy silnika zasilanego mieszanką benzynowo – powietrzną np. o współczynniku nadmiaru powietrza wynoszącym 1,5 i wartości kąta wyprzedzenia zapłonu wynoszącym 40° OWK przed GZP. Zwykle, przy takich parametrach regulacyjnych, podczas zasilania benzyną, standardowe silniki ZI nie mogą pracować.

Ponadto należy mieć na uwadze konieczność spełnienia limitów emisji toksycznych składników spalin, przewidzianych dla silników przemysłowych. Powoduje to zwykle konieczność zasilania silnika mieszanką stechiometryczną, która umożliwia pełne wykorzystanie możliwości zmniejszania emisji gazowych, toksycznych składników spalin w katalitycznym reaktorze utleniająco-redukującym. W pracy Autor nie odniósł się do tego problemu.

Zamieszczone w rozdz. 5.2 wyniki pomiaru parametrów roboczych silnika oraz emisji toksycznych składników spalin nie zostały należyście zinterpretowane w aspekcie analizy zjawisk spowodowanych wprowadzeniem opracowanej przez Autora pracy „regulacji hybrydowej”. Podobna uwaga dotyczy wyników badań przedstawionych w rozdz. 5.3.

W rozdziale 5.3 nie podano kryteriów doboru koła zamachowego, którego rysunek (rys. 5.3.1.5.) zamieszczono w pracy bez uzasadnienia i omówienia. Zamieszczony w rozdz. 5.3.3 opis badań trwałościowych nie ma żadnego związku z tematem rozprawy, a wartość merytoryczna przedstawionych wyników jest znikoma, wobec braku przedstawienia celu i metodyki przeprowadzenia tych badań. Podobny charakter ma także treść rozdz. 6.2.2, w którym bez potrzeby i uzasadnienia zamieszczono wybrane wyniki badań silnika zasilanego amoniakiem. Zawarte w rozdz. 6.3 wnioski końcowe nie odnoszą się do postawionych tez rozprawy i w większości nie dotyczą realizowanego w pracy naukowego problemu badawczego.

W pracy Autor nie ustrzegł się także od usterek o charakterze redakcyjnym, przy czym nie miały one większego wpływu na ocenę merytoryczną rozprawy.

Praca została zredagowana niezbyt starannie, o czym świadczy np. przeniesienie podpisów rysunków na następną stronę (str. 61, 63), zamieszczania zbędnych rysunków bez należytego komentarza w treści pracy, np. (rys. 5.3.1.5, rys. 5.2.2.11.) lub też zamieszczenie dwóch rysunków oznaczonych tym samym numerem (rys. 4.3.3.3 na str. 81 i 82), na których przedstawiono elementy nic nie wnoszące do treści rozprawy. Wyjaśnienia wymagają także podpisy pod rys. 5.2.2.5. i 5.2.2.6. – na pierwszym *Fluktuacje temperatury*, a na drugim, przedstawiającym te same zależności: „*Zmiana temperatury*....”.

Uwaga dotyczy bardzo często używanych w pracy określeń z języka potocznego, takich jak np.: „...podwyższanie, podniesienie, ...obniżanie”, „...wzrost, ...spadek”, „...wysoki, ...niski”, zamiast jednoznacznych, technicznych określeń: „...mała, ..duża wartość”, czy też „zmniejszanie, ...zwiększanie wartości”. Na str. 13 użyto określenia „metodologia”, co oznacza naukę o metodach badawczych, a Autorowi zapewne chodziło o „metodykę”. W tabeli na str. 59 Autor używa określenia „stopień sprężania”, podczas, gdy w całej pracy

stosuje określenie „ stopień kompresji”. W tabeli tej zwraca uwagę także pozycja ”waga” (jest to urządzenie do pomiaru masy). W całej pracy Autor stosuje określenie „pojemność skokowa silnika”, podczas gdy prawidłowo powinno być „objętość skokowa”, ze względu na jednostki (m^3 , cm^3), które są jednostkami objętości, a nie pojemności. Autor używa niekiedy terminów, które nie powinny znaleźć się w pracy naukowej, np. na str. 90 „ustabilizowanie *obrotów*”, zamiast „ustabilizowanie prędkości obrotowej” lub „procedura *startu* silnika”, zamiast „*uruchomienia*”.

W pracy zastosowano 4-znakowe oznaczanie rysunków, przyporządkowując je do podrozdziałów, podczas gdy w pracach naukowych rysunki przyporządkowuje się zwykle do głównych rozdziałów. W pracy występują ponadto liczne pomyłki literowe.

PODSUMOWANIE I WNIOSEK KOŃCOWY

Mimo wymienionych uwag natury merytorycznej i redakcyjnej, recenzowana praca doktorska autorstwa **Pana mgr. inż. Łukasza Ziółkowskiego pt. „Analiza energetyczna układu kogeneracyjnego z silnikiem ZI w zakresie zmiennych parametrów regulacyjnych”**, jest wartościowym dziełem, którego realizacja wymagała od Autora ogromnego wysiłku badawczego, wszechstronnej wiedzy oraz umiejętności prowadzenia złożonych badań naukowych w kilku dyscyplinach.

Podjęty temat dotyczy aktualnego problemu badawczego, związanego z racjonalnym gospodarowaniem energią. Opracowana koncepcja systemu regulacji silnika, nosi w sobie cechy nowości i może znaleźć praktyczne zastosowanie w projektowanych urządzeniach energetycznych.

Tym samym zostały osiągnięte zasadnicze cele naukowe realizowanej rozprawy, co stanowi oryginalny dorobek naukowy Doktoranta oraz wkład w dziedzinę nauki dotyczącą dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.

Uważam, że recenzowana praca doktorska pt.: „**Analiza energetyczna układu kogeneracyjnego z silnikiem ZI w zakresie zmiennych parametrów regulacyjnych**”, której Autorem jest **Pan mgr inż. Łukasz Ziółkowski**, spełnia wymagania ustawy z dnia 14 marca 2003 r „Prawo o szkolnictwie wyższym” wraz ze zmianami niektórych innych ustaw (Dz.U. poz. 1668), a także przepisy określone w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 1 maja 2011 roku (Dz. U. Nr 196 poz. 1165) oraz zalecenia Rady Doskonałości Naukowej z dnia 8.08.2019 r.

Na tej podstawie wnioskuję o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie **mgr. inż. Łukasza Ziółkowskiego** do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny *Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka* Politechniki Śląskiej.



Kraków, dnia 22. 09. 2023 r.