

## RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr. inż. Samata SUNDETOVA pt.:  
„STEROWANIE ROBOCZYM PROCESEM SILNIKÓW  
WYSOKOPRĘŻNYCH W WARUNKACH OBNIŻONEJ  
GĘSTOŚCI ATMOSFERY”

### 1. Podstawa opracowania recenzji

Przedmiotem opinii jest rozprawa **mgr inż. Samata Sundetova** pt.: „Sterowanie roboczym procesem silników wysokoprężnych w warunkach obniżonej gęstości atmosfery“, wykonanej pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Waldemara Wójcika z Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej i doc. dr inż. Murata Mussabekova Omarbekovicha z Akademii Logistyki, Ałmaty, Kazachstan.

Recenzja została przygotowana na zlecenie prof. dr. hab. inż. Piotra Kisały, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej „Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne“ Politechniki Lubelskiej (pismo RDN\_AEiE\_W\_128\_20-24 z dnia 29.09.2023 r.) na podstawie dostarczonej rozprawy doktorskiej pod wyżej wymienionym tytułem.

### 2. Charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska została napisana w języku rosyjskim, liczy 114 stron druku łącznie ze spisem literatury w liczbie 87 pozycji. Bibliografia odzwierciedla współczesny stan wiedzy z zakresu technologii spalania paliwa w silnikach wysokoprężnych, przetwarzania sygnałów oraz technik kontroli i badania procesu spalania w warunkach obniżonej gęstości atmosfery. Dobór literatury jest celowy i poprawny. Układ pracy nie budzi moich zastrzeżeń, a używana terminologia jest poprawna i zrozumiała.

### 3. Ocena podjętego tematu rozprawy

Istotnym źródłem emisji szkodliwych substancji do atmosfery są silniki wysokoprężne stosowane w transporcie samochodowym. Emisja ta w tych silnikach zależy od jakości

procesu spalania paliwa, na co znaczący wpływ mają parametry atmosfery. W warunkach obniżonej gęstości atmosfery powodującej podwyższoną temperaturę lub obniżone ciśnienie atmosferyczne (związane z eksploatacją tych silników na dużych wysokościach nad poziomem morza), pogarsza się jakość spalania poprzez wzrost poziomu emisji szkodliwych substancji,

w szczególności tlenku węgla i sadzy oraz obniża się moc silnika.

W pracy przeprowadzona została analiza dotycząca powstawania substancji toksycznych, tj. tlenku węgla, tlenków azotu, węglowodorów oraz sadzy, które powstają w procesie spalania paliw w silnikach wysokoprężnych. Dla opracowania modelu matematycznego przeanalizowano mechanizmy powstawania sadzy, tj. kondensację swobodnych atomów i molekuł węgla, polimeryzację i kondensację węglowodorów, niskotemperaturowy mechanizm fenyłowy i wysokotemperaturowy mechanizm acetylenowy. Omówiono osobliwości mechanizmu powstawania sadzy w komorze spalania silników wysokoprężnych i przedstawiono uogólnione równania dyfuzyjnego procesu spalania paliw w tych silnikach, będące modelem matematycznym wykorzystanym do porównania wyników teoretycznych z eksperymentalnymi. Badania eksperymentalne przeprowadzone zostały na eksperymentalnym stanowisku badawczym, zaś analiza uzyskanych wyników pozwoliła na stwierdzenie ich dużej zbieżności z rezultatami teoretycznymi.

Obszar badawczy, którego dotyczy rozprawa doktorska, to analiza wpływu temperatury panującej w komorze spalania oraz alkoholowych dodatków na parametry procesu roboczego silnika wysokoprężnego oraz na jego ekologię. Rozprawa wpisuje się w obszar badań zmierzających do zwiększenia kontroli nad procesem spalania w warunkach zmniejszonej gęstości atmosfery, poprzez wprowadzenie dodatków do paliwa, co skutkuje wzrostem parametrów procesu roboczego oraz obniżeniem negatywnego wpływu na środowisko naturalne. Ten cel został osiągnięty, a zbieżność wyników teoretycznych i eksperymentalnych świadczy o prawidłowej realizacji badań dotyczących zmniejszenia negatywnego wpływu wykorzystywania silników wysokoprężnych w warunkach obniżonej gęstości atmosfery, na środowisko.

Praca ma charakter teoretyczno-eksperymentalny, w której pomiary praktyczne realizowane były na przygotowanym stanowisku badawczym, które pozwalało na realizację niezbędnych pomiarów w całym obszarze badawczym. Praca ma charakter rozwojowy, w wielu obszarach nie wyczerpuje tematyki badawczej, natomiast pokazuje kierunek możliwych przyszłych badań i analiz.

#### **4. Analiza i ocena merytoryczna pracy**

W rozdziale pierwszym rozprawy, który stanowi wstęp, zawarto wprowadzenie do tematyki podejmowanej w dysertacji. Rozdział ten jest syntetycznym przeglądem literaturowym związanym z podejmowaną problematyką. W szerokim ujęciu zaprezentowano

aspekty społeczne, ekonomiczne i ekologiczne, stojące u podstaw eksploatacji silników wysokoprężnych. Zaprezentowane są przemyślenia własne Doktoranta odnoszące się do eksploatacji silników wysokoprężnych w warunkach obniżonej gęstości atmosfery z wykorzystaniem dodatków alkoholowych mających na celu wzrost efektywności procesu spalania oraz zmniejszenia zanieczyszczeń atmosfery. Zakres i jakość przeglądu literaturowego świadczy o umiejętnościach Autora do poruszania się w podejmowanej tematyce.

Rozdział drugi zawiera tezę, cel i zakres pracy. Została tutaj sformułowana teza rozprawy: **Oddziaływując na roboczy proces silnika wysokoprężnego drogą wykorzystania alkoholowych dodatków do paliwa można zmniejszyć emisję szkodliwych substancji i polepszyć jego wskaźniki w warunkach obniżonej gęstości atmosfery.**

Za cel rozprawy przyjęto obniżenie emisji substancji szkodliwych i polepszenie parametrów pracy silnika wysokoprężnego w warunkach obniżonej gęstości atmosfery drogą oddziaływania na proces roboczy.

Zakres pracy obejmuje: przedstawienie oddziaływania parametrów atmosfery na energetyczno-ekologiczne parametry silnika wysokoprężnego, uzyskanie danych o wpływie temperatury i dodatków alkoholowych na charakter termodynamicznego przekształcania paliw i wskaźników procesu roboczego w warunkach obniżonej gęstości atmosfery, interpretację i obróbkę danych eksperymentalnych oraz modelowanie procesu roboczego.

Rozdział trzeci stanowi omówienie wpływu przyrodniczo – klimatycznych parametrów oddziaływujących na proces roboczy w silnikach wysokoprężnych stosowanych w środkach transportu. Rozdział ten jest ważnym elementem pracy wprowadzającym do zagadnień diagnostyki technicznej w procesie spalania wykorzystywanym w silnikach wysokoprężnych.

W rozdziale tym przedstawione zostały parametry przyrodnicze i klimatyczne regionów, określające warunki niestandardowe, wpływ warunków klimatycznych na parametry procesu roboczego silnika wysokoprężnego z uwzględnieniem obniżonej gęstości atmosfery na wartość okresu opóźnienia zapłonu oraz przyczyn zwiększonej emisji produktów niepełnego spalania w spalinach. Przedstawiona została tam również analiza sposobów poprawy energetyczno – ekologicznych parametrów silników wysokoprężnych w warunkach obniżonej gęstości atmosfery, poprawę parametrów procesu roboczego i obniżenie emisji sadzy w spalinach silników wysokoprężnych przy zastosowaniu dodatków alkoholowych do paliwa.

Należy podkreślić, że czynniki klimatyczne w realnych warunkach eksploatacji silników znacznie różnią się od standardowych parametrów środowiska naturalnego, na które zorientowane są parametry silników gwarantowanych przez producentów. W warunkach

rzeczywistych, zarówno wzrost temperatury, jak i obniżenie ciśnienia prowadzą do obniżenia gęstości zasysanego przez silnik powietrza, co z kolei narusza normalny przebieg procesu roboczego w silnikach wysokoprężnych i w konsekwencji prowadzi do obniżenia mocy i zwiększenia emisji sadzy w spalinach. Wprowadzenie tlenu do strefy spalania paliwa prowadzi do zmiany systemu stechiometrycznego wewnątrz komory spalania i będzie prowadzić do poprawy parametrów silników wysokoprężnych w warunkach obniżenia gęstości atmosfery. Możliwość efektywnego wykorzystania dodatków alkoholowych do paliwa uzasadnia dalsze badania niezbędne do udowodnienia postawionej tezy.

Rozdział czwarty, stanowi kontynuację rozdziału trzeciego i prowadzi do dokładniejszego omówienia mechanizmów tworzenia się sadzy, opartych na różnych teoretycznych koncepcjach jej powstawania w komorze spalania silników wysokoprężnych. Przedstawiono

tu również uogólnienie równania opisującego proces dyfuzyjnego spalania paliwa w tych silnikach. Pozwala to na obliczenia powstawania sadzy, uwzględnienie alkoholowych dodatków do paliwa, uwzględnienie dynamiki i struktury płomienia powstałego z wtrysku paliwa oraz wpływu dodatków na proces powstawania sadzy.

Rozdział piąty poświęcony jest omówieniu eksperymentalnego stanowiska i metodyce badań eksperymentalnych. Podstawowymi parametrami wpływającymi na przebieg procesu spalania w stanowisku eksperymentalnym są:

- temperatura parownika i reaktora,
- czas trwania pracy reaktora,
- masowe zużycie paliwa przez reaktor,
- dodatki alkoholowe do paliwa.

Stopień wpływu przedstawionych parametrów na proces termochemicznych przemian procesu był oceniany przez:

- stopień gazyfikacji,
- maksymalną wydajność lekkich składników mieszaniny gazowej,
- minimalną ilość powstawania sadzy.

Podczas badań eksperymentalnych zostały przeprowadzone:

- analiza chromatograficzna produktów procesu,
- pomiar masy paliwa i produktów procesu,
- pomiar ciepła spalania paliwa,
- zużycie badanego paliwa,
- czas kontaktu.

Ilość emisji ciał stałych było oceniane sumowaniem masy koksu, który odłożył się na ściankach reaktora i sadzy znajdującej się w zestawie ciekłych i gazowych produktów.

W stanowisku eksperymentalnym zastosowane urządzenia pomiarowe pozwalały na przeprowadzenie badań zgodnie z europejskim standardem bezpieczeństwa. Stanowisko to pozwalało na przeprowadzenie badań wpływu różnych parametrów na proces termochemicznego przekształcenia paliwa oraz dawało możliwość zapisu wszystkich parametrów procesu roboczego silnika, stanu cieplnego silnika, a także analizę składu zużytych gazów w różnych wariantach jego pracy.

Rozdział szósty poświęcony jest analizie wyników badań eksperymentalnych. Obejmuje on badania procesu powstawania sadzy przy termochemicznym przetwarzaniu paliw, ocenę zmian energetyczno – ekologicznych wskaźników silników wysokoprężnych w warunkach obniżonej gęstości atmosfery, wpływ alkoholowych dodatków na parametry procesu roboczego i dymność spalin.

Uzyskane rezultaty eksperymentalne i obliczeniowe dają zadowalającą zbieżność, co świadczy o poprawności wykorzystywanego modelu i jego przydatności dla obliczeń roboczego procesu i ilości sadzy w zestawie spalin.

Rozdział siódmy to podsumowanie rozprawy i wnioski. W oparciu o sformułowane sześć wniosków wykazano przydatność zaproponowanego rozwiązania w celu uzyskania obniżenia emisji szkodliwych substancji przy pracy silników wysokoprężnych w warunkach obniżenia gęstości atmosfery.

## **5. Uwagi szczegółowe**

Teza i cel pracy zostały sformułowane w sposób prawidłowy i rzetelny, niebudzący wątpliwości i niedomówień. Praca w sposób spójny realizowana jest według nakreślonego celu, co prowadzi do udowodnienia postawionej tezy. Przyjęta metodyka postępowania jest logiczna, prowadzona jest bowiem od zdefiniowania potrzeb i wymogów, poprzez analizy, aż po badania eksperymentalne.

Praca ma charakter teoretyczno – eksperymentalny, wskazuje kierunki i obszary dalszych poszukiwań. Analizowane wyniki modelowania oraz eksperymentalne, przeprowadzone na stanowisku badawczym dają dużą zbieżność oraz potwierdzają prawidłowość realizowanych badań.

Za osiągnięcia własne Doktoranta uważam:

- Umiejętność kompleksowego przeprowadzenia eksperymentu badawczego, poprzedzonego badaniami symulacyjnymi, a zbieżność rezultatów świadczy o poprawności procesu badawczego;
- Wśród potencjalnie dużej liczby mechanizmów powstawania sadzy, został wybrany jeden pozwalający na uzyskanie uogólnionego równania procesu dyfuzyjnego spalania paliwa w silnikach wysokoprężnych;

- Zastosowanie dodatków alkoholowych do paliwa, które pozwalają na obniżenie emisji substancji szkodliwych i poprawę parametrów roboczych silnika wysokoprężnego w warunkach obniżonej gęstości atmosfery;
- Przeprowadzenie badań eksperymentalnych w warunkach odpowiadających pracy silnika na wysokości 3340 m nad poziomem morza.

Do słabszych stron pracy, które Doktorant powinien wyjaśnić, zaliczam pytania:

1. Jakie są kluczowe zalety i ograniczenia przedstawionych rozwiązań w porównaniu z istniejącymi metodami sterowania silnikami wysokoprężnymi w standardowych warunkach atmosferycznych?
2. Jakie perspektywy rozwoju i dalsze badania mogą być związane z wynikami Pańskiej dysertacji?
3. Jakie parametry i charakterystyki procesu roboczego silnika wysokoprężnego wykazują największy wpływ na efektywność i niezawodność pracy w warunkach obniżonej gęstości atmosfery?
4. Czy jest możliwe zastosowanie zaproponowanej przez Pana metody sterowania procesem roboczym dla zastosowania w różnych typach silników wysokoprężnych i w różnych strefach klimatycznych?
5. W jaki sposób realizowane przez Pana badania i uzyskane wyniki mogą być wykorzystane w przemyśle lub dla opracowania nowych standardów i norm dla silników wysokoprężnych?
6. Jakie ograniczenia i przesłanki zaproponowanych rozwiązań należy uwzględnić przy zastosowaniu zaproponowanych rozwiązań w warunkach rzeczywistych eksploatacji silników wysokoprężnych?

Uwagi powyższe nie wpływają na całościowy odbiór pracy, który uważam za pozytywny.

## **6. Podsumowanie i konkluzja**

Zapoznając się szczegółowo z przedstawioną rozprawą doktorską stwierdzam, że:

- Przedstawiona w rozdziale drugim teza rozprawy została udowodniona poprzez:
  - opracowanie modelu matematycznego pozwalającego na przeprowadzenie eksperymentów obliczeniowych,
  - przeprowadzone badania eksperymentalne na stanowisku badawczym wykazujące dużą zbieżność z rezultatami symulacyjnymi, co świadczy o poprawności realizowanych badań teoretycznych i eksperymentalnych,
- Cel rozprawy został osiągnięty w zakresie sformułowanym przez Doktoranta,

- Tematyka rozprawy jest aktualna i dobrze nawiązuje zarówno do wiedzy teoretycznej, jak i praktyki
- Wskazane zostały potrzeba i perspektywy dalszych badań, zmierzających do uogólnienia metody doboru dodatków do paliwa w silnikach wysokoprężnych pracujących w warunkach zmniejszonej gęstości atmosfery.

Biorąc pod uwagę całość rozprawy, jej wartość i wkład własny uważam, że **Doktorant sformułował i rozwiązał ważny problem badawczy w zakresie dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, osiągnął wyznaczony cel pracy oraz udowodnił postawioną tezę.**

Uwzględniając wszystkie przedstawione moje oceny stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Samata Sundatova pt.: „Sterowanie roboczym procesem silnika wysokoprężnego w warunkach obniżonej gęstości atmosfery“ spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim w rozumieniu Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r., „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2020 r., poz. 85) i wnoszę do Rady Dyscypliny Naukowej „Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne“ Politechniki Lubelskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Miroslaw duft