

## **RECENZJA**

Rozprawy doktorskiej mgr. inż. Asel Musabekovej pt.:  
„DIAGNOSTYKA PROCESU SPALANIA Z WYKORZYSTANIEM METOD OPTYCZNYCH”

### **1. Podstawa opracowania recenzji**

Przedmiotem opinii jest dostarczona dysertacja mgr inż. Asel Musabekovej pt.: Diagnostyka procesu spalania z wykorzystaniem metod optycznych. Promotorem rozprawy jest dr. hab. inż. Andrzej Smolarz, prof. uczelni z Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej.

Recenzja została przygotowana na zlecenie prof. dr. hab. inż. Piotra Kisaly, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej „Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne” Politechniki Lubelskiej (pismo RDN\_AEiE\_W\_135\_20-24 z dnia 16.03.2023 r.) na podstawie dostarczonej rozprawy doktorskiej pod wyżej wymienionym tytułem.

### **2. Charakterystyka rozprawy**

Rozprawa doktorska mgr. inż. Asel Musabekovej jest napisana w języku rosyjskim, liczy 99 stron z załącznikami, w tym 68 stron tekstu głównego. Zamieszczona bibliografia, w liczbie 406 pozycji, jest wystarczająca i stanowi odzwierciedlenie stanu wiedzy w zakresie tematyki rozważań podjętych w rozprawie. Praca podzielona jest na 10 głównych rozdziałów w tym wstęp i podsumowanie. Materiał graficzny rozprawy jest przejrzysty, a treść jednoznacznie określa dokonania badawcze Doktorantki. Układ pracy nie budzi większych zastrzeżeń, a używana terminologia jest poprawna i zrozumiała.

### **3. Ocena tematu rozprawy**

Ponad 80% energii elektrycznej na świecie powstaje w wyniku spalania paliw kopalnych (ropa naftowa, węgiel, gaz) i biopaliw. Węgiel jest jednym z najstarszych, i w wielu krajach wciąż kluczowym źródłem energii. Pomimo szybkiego rozwoju

odnawialnych źródeł energii, w przewidywalnej przyszłości węgiel nadal będzie wykorzystywany do jej produkcji. Optymalizacja spalania w kotłach energetycznych pod względem wydajności spalania, jak i redukcji substancji szkodliwych, jest więc pilnym zadaniem dla energetyki. Pomimo wprowadzenia sterowania cyfrowego, wykorzystującego zmienne procesowe oraz wielkości stężenia wybranych składników w spalinach, obecne normy emisji są trudne do spełnienia. Zaostrzenie norm emisji spalin wymusza zmiany w obecnych układach sterowania, oraz zastosowanie skuteczniejszych systemów diagnostycznych. Zgodnie z najnowszymi osiągnięciami i trendami w nauce wykorzystywane są algorytmy sztucznej inteligencji. Z drugiej strony wykorzystanie wielkości pomiarowych, które są opóźnione oraz uśrednione dla całego kotła nie pozwala na optymalizację procesu spalania paliwa w każdym palniku kotła energetycznego. Konieczne jest zastosowanie selektywnej diagnostyki parametrów spalania dla płomienia, np. za pomocą metod optycznych. Tematyka podjęta przez doktorantkę jest więc aktualna i ma perspektywy aplikacyjne. Tytuł przedmiotowej rozprawy doktorskiej jest zgodny z jej zawartością i poruszaną tematyką naukową.

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

Rozprawa doktorska mgr. inż. Asel Musabekovej ma charakter interdyscyplinarny i głównie dotyczy zagadnień interpretacji pomiarów optycznych za pomocą metod sztucznej inteligencji i wykorzystaniu tych pomiarów do diagnostyki spalania.

Praca podzielona jest na 10 głównych rozdziałów. Rozdział pierwszy zawiera wprowadzenie do tematu pracy i opisuje jej genezę oraz istotę. Rozdział drugi zawiera tezę: „Wykorzystanie optycznych sygnałów pomiarowych w diagnostyce procesu spalania pyłu węglowego umożliwi wczesne wykrywanie i trafne rozpoznawanie stanów awaryjnych”. W rozdziale tym sformułowano również cel pracy: wyznaczenie wektora cech sygnału optycznego, pozwalającego na diagnozowanie procesu spalania pyłu węglowego. Autorka określiła również zakres swojej pracy. W rozdziale trzecim przedstawiono szereg metod diagnostyki spalania, ich zakres zastosowania, a także mocne i słabe strony. Jedynie część tych metod nadaje się do zastosowania do procesów przemysłowych. W rozdziale czwartym autorka skupiła się na optycznych, pasywnych metodach monitorowania płomienia. Opisała płomień, jako źródło promieniowania, dla różnych rodzajów paliw. Należy tu zaznaczyć, że optyczna ocena procesu spalania, przez długi okres czasu, dokonywana była poprzez wizualną ocenę płomienia. W tym celu w kotle przewidziano szereg otworów rewizyjnych. Dostęp optyczny może być realizowany poprzez instalację czujników wewnątrz palnika. Niektóre kotły

energetyczne są wyposażone w specjalnie przystosowane kamery, które umożliwiają przesyłanie obrazów wnętrza komory spalania do pomieszczenia operatora. Optyka jest najczęściej chłodzona i czyszczona sprężonym powietrzem. Metody aktywne (absorpcja, PIV, LDV, LIF) dają potencjalnie duże możliwości w zakresie liczby parametrów. Wykazano, że są one niezwykle trudne, jeśli nie niemożliwe do zastosowania w warunkach przemysłowych. Ponadto problematyczne jest ich zastosowanie do płomieni pyłowych. W rozdziale piątym opisano diagnostykę płomienia pyłowego w oparciu o optyczne metody pomiarowe. Autorka przedstawiła podstawy diagnostyki przemysłowej oraz sondę światłowodową, która została użyta w części doświadczalnej. Rozdział szósty poświęcony został sztuczным sieciom neuronowym, w szczególności sieciom głębokim. Autorka przeanalizowała możliwości najpopularniejszych bibliotek do trenowania głębokich sieci neuronowych – Caffé, Theano, TensorFlow, Torch, CNTK oraz Keras. Wszystkie wymienione biblioteki mogą wykorzystywać zarówno procesory wielordzeniowe, jak i akceleratory GPU (w tym zoptymalizowaną bibliotekę cuDNN) w celu przyspieszenia uczenia. Istotną zaletą jest to, że nie ma potrzeby ponownego wykonywania programu, gdyż zrównoleglenie obliczeń na CPU i GPU odbywa się automatycznie. Rozdział siódmy stanowi opis części doświadczalnej. Autorka na początku opisuje stanowisko doświadczalne znajdujące się w Instytucie Energetyki w Warszawie. Jest to komora spalania z pojedynczym palnikiem pyłowym w skali 1:10 względem niskoemisyjnego palnika przemysłowego. Obiekt został wybrany ze względu na możliwość eksperymentowania z pojedynczym palnikiem i dobre opomiarowanie. Następnie autorka przedstawia metodykę badań. W kolejnej części przedstawione są dane pomiarowe i ich wstępna charakterystyka. Następnie autorka opisuje sposób wstępnej analizy danych i charakteryzuje zestaw danych wykorzystywanych do następnego etapu – klasyfikacji. Rozdział ósmy w całości poświęcony jest implementacji oprogramowania i przetwarzania danych. Autorka przedstawia tu algorytm LSTM i jego implementację a także jego warianty CNN-LSTM oraz ConvLSTM. Następnie, tabelarycznie, przedstawione są wyniki działania wszystkich trzech modeli. Do oceny autorka użyła dwie metryki, Accuracy i Loss. Dokładność (Accuracy) jest obliczana od 0 do 100, a im wyższa tym lepsza ocena. Funkcja straty (Loss) przyjmuje wartości od zera do pewnej liczby, w tym przypadku im jej wartość jest bliższa zeru tym lepsza ocena modelu. Wyniki pokazują, że za pomocą modelu ConvLSTM, w porównaniu do innych modeli, osiągane są zdecydowanie najlepsze wyniki. Mediana i IQR w większości mieści się w przedziale od 85 do 99, ze stosunkowo niewielkimi odchyleniami. Rozdział dziewiąty stanowi podsumowanie pracy. Autorka w skrócie przedstawia problematykę rozprawy, wykonane badania i wnioski z ich rezultatów. Autorka

stwierdza, że dzięki zastosowaniu systemu optycznego i głębokich sieci neuronowych z dużą dokładnością możliwe jest rozpoznanie stanu pracy palnika zarówno podczas spalania węgla, jak i jego mieszanki z biomasą, co potwierdza słuszność postawionej tezy. W rozdziale tym Autorka wskazuje na własne osiągnięcia oraz pokazuje dalsze kierunki rozwoju badań opisywanych w rozprawie.

## **5. Ocena oryginalności rozprawy i aktualności poruszanej tematyki badawczej**

Analizując pracę mogę stwierdzić, że Doktorantka jasno określiła temat i cel pracy oraz prawidłowo sformułowała tezę. Materiał badawczy przygotowany był starannie, a zastosowane narzędzia i metody badawcze pozwoliły na skuteczną realizację oryginalnych badań. Tematyka rozprawy jest aktualna i istotna z punktu widzenia potencjalnych zastosowań uzyskanych wyników. Realizacja badań i zawartość pracy, w której zostały one opisane świadczą o zaawansowanej wiedzy Autorki. Wiedza ta koresponduje z obszarem prowadzonych przez nią badań. Rozprawa obejmuje nowe osiągnięcia nauki i świadczy o znajomości współczesnej literatury. Na podkreślenie zasługuje interdyscyplinarny charakter pracy.

Za najważniejsze osiągnięcia Doktorantki uważam:

- Zastosowanie optycznego systemu monitoringu do wykrywania niepożądanych stanów pracy palnika, co zapewnia większą selektywność i szybszą reakcję na wystąpienie takich stanów.
- Zastosowanie algorytmów głębokiego uczenia, upraszczających fazę wstępnego przetwarzania i analizy sygnału (np. brak ekstrakcji cech),
- Zaproponowanie i analizę wariantów implementacji architektury głębokich rekurencyjnych sieci neuronowych do klasyfikacji szeregów czasowych intensywności płomienia, niezależnie od mocy cieplnej palnika.
- Potwierdzenie tezy, że możliwe jest wczesne wykrywanie i trafne rozpoznawanie stanów awaryjnych stanu pracy palnika zarówno podczas spalania węgla, jak i jego mieszanki z biomasą. Dokładność rozpoznawania stanów uzyskana przez Autorkę była wyższa niż 0,8.

Uwagi krytyczne:

- Jednym z celów postawionych przez Doktorantkę było „wyznaczenie wektora cech

sygnału optycznego” – w zasadzie taki wektor nie jest opisany i został ukryty we wnętrzu głębokiej sieci neuronowej. Autorka o tym nie wspomina, co tworzy wrażenie braku spójności między celami rozprawy a głównymi wnioskami.

- Umieszczenie podsumowania wyników badań na końcu rozdziałów części doświadczalnej zdecydowanie poprawiłoby czytelność pracy.
- Wydaje mi się, że Autorka powinna zredukować spis źródeł ograniczając się do najnowszej literatury.
- Wartości współczynnika nadmiaru powietrza przyjęte w badaniach są dosyć odległe. Czy Autorka planuje wykonanie badań dla mniejszych odchyień od stanu przyjętego za „normalny”?

Wymienione przeze mnie uwagi krytyczne oraz wątpliwości nie wpływają na pozytywną ocenę przedstawionej pracy doktorskiej i nie umniejszają mojej pozytywnej oceny oryginalności rozprawy i aktualności poruszanej tematyki badawczej.

## 6. Podsumowanie

Reasumując, stwierdzam że rozprawa doktorska mgr inż. Asel Musabekovej: „Diagnostyka procesu spalania z wykorzystaniem metod optycznych” spełnia ustawowe wymogi stawiane pracom doktorskim w odniesieniu do oryginalności problemu naukowego, umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz wiedzy teoretycznej. W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Asel Musabekovej do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

