

TŁUMACZENIE POŚWIADCZONE Z JĘZYKA ROSYJSKIEGO

Prof. dr hab. inż. Tkachenko Stanislav,

Wydział Inżynierii Energetyka Ciepłny
Winnicki Narodowy Uniwersytet Techniczny, Winnica

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej Assel Mussabekovej pt.: „Wykorzystanie metod deep learning do diagnostyki procesu spalania pyłu węglowego”

1. Podstawa do sporządzenia recenzji.

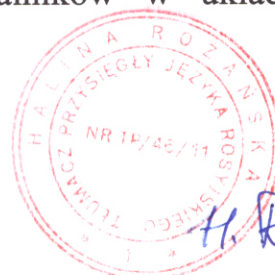
- pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Politechniki Lubelskiej z dnia 30 listopada 2022 roku, Uchwała nr AEiE/29_2.9b/20-24;
- rozprawa doktorska mgr inż. Assel Mussabekovej zatytułowanej „Wykorzystanie metod deep learning do diagnostyki procesu spalania pyłu węglowego”;
- Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2020 r., poz. 85);
- Ustawa z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz. U. z 2018 r., poz. 1669).

2. Charakterystyka pracy.

Przedstawiona do rozpatrzenia rozprawa doktorska napisana jest w języku rosyjskim, liczy 99 stron z załącznikami, w tym 68 stron tekstu głównego drukowanego oraz spis piśmiennictwa w ilości 406 tytułów. Bibliografia odzwierciedla aktualny stan wiedzy z zakresu badań nad wykorzystaniem optycznych sygnałów pomiarowych w monitorowaniu procesu spalania pyłu węglowego.

Literatura została dobrana w sposób celowy i prawidłowy.

Rozprawa podzielona jest na 10 głównych rozdziałów, obejmujących wstęp, wnioski, literaturę i załączniki. Efektem końcowej pracy kwalifikacyjnej jest wdrożony wielokanałowy, światłowodowy system kontroli płomienia przeznaczony do pracy w środowiskach przemysłowych. Zaprezentowany w pracy materiał ilustracyjny jest przejrzysty i odzwierciedla dorobek Assel Musabekovej w rozwiązywaniu problemu automatyzacji palników w układach spalania paliw



Halina Różańska

niskowęglowych. Zaprezentowane metody zapewniają wysoką wydajność przy stosunkowo krótkim czasie przetwarzania, co pozwala na zastosowanie proponowanej metody w przemysłowych instalacjach spalania.

Postawione w rozprawie zadania są poprawne i jasne, a zastosowana terminologia rzetelna i zrozumiała.

3. Aktualność tematu pracy doktorskiej.

Ponad 80% światowej energii elektrycznej powstaje w wyniku spalania kopalnych paliw węglowodorowych (ropa, węgiel, gaz, biozasoby). Węgiel jest jednym z najstarszych i obecnie kluczowym źródłem energii w energetyce ciepłej wielu krajów świata. Pomimo aktywnego rozwoju odnawialnych źródeł energii, węgiel w najbliższej przyszłości pozostanie popularnym źródłem wytwarzania energii elektrycznej.

Optymalizacja spalania węglowodorów w blokach energetycznych jest aktualnym problemem w energetyce ciepłej, zarówno z punktu widzenia efektywności spalania, jak i ograniczenia emisji szkodliwych substancji do atmosfery. Rozwiązywaniu tych dwustronnych problemów poświęcona jest praca grup badawczych na całym świecie. W tym przypadku niezwykle istotne jest zadanie utrzymania optymalnego stosunku powietrza do paliwa w strefie spalania każdego palnika. Jeśli stosunek jest optymalny, spalanie zachodzi z maksymalną wydajnością, a końcowymi produktami spalania są tylko dwutlenek węgla i woda. Zapewnienie optymalnego spalania w przypadku jednopalnikowego spalania jest dość proste. W tym celu należy kontrolować stężenie tlenu i wodoru w produktach spalania i poprzez regulację proporcji powietrza w mieszance paliwowo-powietrznej utrzymywać je na optymalnym poziomie.

Pomimo wprowadzenia sterowania cyfrowego wykorzystującego zmienne procesowe i opóźnienia oraz średnie stężenia wybranych składników w spalinach, obecne standardy emisyjne są trudne do spełnienia. Zaostrzenie norm emisyjnych wymaga zmian w obecnie stosowanych układach sterowania, które powinny zostać uzupełnione skutecznymi systemami diagnostycznymi. Konieczność spełnienia tych rygorystycznych wymagań doprowadziła do powstania szeregu programów badawczych, przede wszystkim na terenie Unii Europejskiej (UE).

Stosowane są algorytmy sztucznej inteligencji. Systemy eksperckie służą głównie do modelowania, ale także do diagnostyki. Tworzenie i rozwój metod diagnozowania procesów spalania jest jednym z pilnych zadań badań naukowych i stosowanych. Obecnie kontrola trybu pracy kotła energetycznego odbywa się w oparciu o informacje przede wszystkim o stężeniu tlenu resztkowego i szkodliwych składników w produktach spalania. Sterowanie takie uwzględnia jednak jedynie charakterystyki integralne, co nie pozwala na optymalizację procesu spalania paliwa w każdym palniku kotła energetycznego. Zastosowanie selektywnej diagnostyki parametrów płomienia pozwala określić objętościowo-lokalną charakterystykę



H. Rózdudko

płomienia i w rezultacie efektywnie kontrolować proces spalania.

Zatem temat jest bardzo aktualny. Połączenie wyników uzyskanych wybraną metodą diagnostyczną z komputerowym przetwarzaniem danych o składzie produktów reakcji chemicznych, temperaturze i grubości stref reakcji oraz pomiarze prędkości rozprzestrzeniania się płomienia umożliwi rozwiązywanie zadań fizykochemicznych teorii spalania paliw.

4. Analiza przedmiotowa i ocena pracy.

Pierwszy rozdział rozprawy, będący wstępem, zawiera wprowadzenie do tematu, który jest rozważany w rozprawie, a także opisuje aktualność pracy. Rozdział ten stanowi syntetyczny przegląd literatury dotyczącej zagadnień poruszanych w pracy.

Rozdział ten przedstawia własne przemyślenia autora na temat sprostania wyzwaniom związanym z wdrażaniem wielokanałowego światłowodowego układu monitorowania płomienia przeznaczonego do pracy w środowisku przemysłowym.

Rozdział drugi zawiera tezę, cel i zakres pracy. W rozdziale tym sformułowano cel pracy: wyznaczenie ukierunkowania cech optycznych pozwalających na diagnozowanie procesu spalania pyłu węglowego.

Do osiągnięć autorki należą: zastosowanie jednego czujnika do wykrywania niepożądanych trybów pracy palnika, co zapewnia większą selektywność i szybszą reakcję na pojawienie się takich warunków, zastosowanie algorytmów głębokiego uczenia się, co znacznie upraszcza etap wstępnego przetwarzania i analizy sygnału.

Niniejsza praca jest jedną z kilku prób rozwiązania problemu automatyzacji palników w układach spalania paliw niskowęglowych. Zastosowane głębokie sieci rekurencyjne zapewniają wysoką wydajność przy stosunkowo krótkim czasie przetwarzania, co pozwala na zastosowanie proponowanej metody w przemysłowych układach spalania.

Niniejsza praca nie wyczerpuje zagadnień związanych z eksploatacją niskoemisyjnego palnika pyłowego.

W rozdziale trzecim przedstawiono wykorzystanie różnych metod diagnostyki płomienia, co pozwala badaczom uzyskać różnorodne dane zawierające informacje o takich charakterystykach jak: temperatura, stężenie różnych substancji, związków i cząstek naładowanych; uzyskać informacje o temperaturze, polach koncentracji, strukturze płomienia, polach prędkości. Każda technika badawcza ma swój własny zakres zastosowania, swoje zalety i wady. Informacje uzyskane w wyniku użycia tych technik są wykorzystywane przez naukowców w dalszym rozwoju nauki o spalaniu – stanowią podstawę nowych teorii, a także służą jako kryterium testowania już istniejących. Również niektóre metody diagnostyki płomienia odgrywają ważną rolę w przemysłowym wykorzystaniu procesów spalania jako podstawowe narzędzie monitorowania niektórych parametrów procesu. Rozwój metod diagnostyki płomienia



H. Rożanśka

był zdeterminowany zarówno rozwojem wiedzy o fizyce zachodzących procesów, doskonaleniem istniejących technik, jak i pojawieniem się zasadniczo nowych urządzeń, które stały się podstawą zaawansowanych technik diagnostycznych. Obecnie rozwój elektroniki i techniki komputerowej umożliwia zarówno udoskonalanie bazy technicznej posiadanych urządzeń diagnostycznych, jak i projektowanie nowych automatycznych zespołów do rejestracji i przetwarzania danych eksperymentalnych, które stanowią istotną pomoc w pracach badawczych.

Rozdział czwarty opisuje czujniki pasywne, które monitorują płomień wypromieniowane przez ogrzane cząstki.

Udowodniono, że kontrola procesu spalania, zwłaszcza w warunkach przemysłowych, jest konieczna zarówno ze względów bezpieczeństwa, jak i ekonomicznych. Monitorowanie, nie mówiąc już o kontroli, wymaga informacji o przebiegu procesu spalania. Odbierane w czasie rzeczywistym sygnały z kilku czujników, które mają różną zasadę działania i są zlokalizowane w różnych miejscach obiektu (instalacji), w którym realizowany jest proces spalania. W pracy przedstawiono przegląd metod stosowanych do pomiaru najważniejszych parametrów procesu spalania paliw. Oceny przebiegu procesu spalania z wykorzystaniem płomienia przez dłuższy czas dokonywano na podstawie informacji odbieranych drogą wzrokową, czyli jest to wizualna ocena płomienia. W tym celu w strefie energetycznej kotła znajduje się szereg otworów rewizyjnych. Dostęp optyczny można uzyskać instalując czujniki wewnątrz palnika. Niektóre kotły energetyczne wyposażone są w specjalnie przystosowane kamery, które pozwalają na przesłanie obrazu z wnętrza komory spalania do sterowni. Najczęściej chłodzenie i czyszczenie optyki odbywa się za pomocą sprężonego powietrza. Potencjalnie większe możliwości pod względem liczby parametrów dają metody aktywne (absorpcja, PIV, LDV, LIF). Wykazano, że ich zastosowanie w warunkach przemysłowych jest niezwykle trudne, jeśli nie niemożliwe. Dodatkowo problematyczne jest zastosowanie w stosunku do płomieni pyłowych.

W rozdziale piątym opisano diagnostykę płomienia w oparciu o optyczne metody pomiarowe. Wykonano schemat blokowy takiego układu. Dostęp optyczny do płomienia można uzyskać za pomocą światłowodu lub, jeżeli konstrukcja palnika na to pozwala, poprzez wolną przestrzeń. Przed fotodetektorem można umieścić filtry optyczne - siatkę stałą, przestrajalną lub siatkę dyfrakcyjną w przypadku spektrometrów. Do wykrywania promieniowania można zastosować fotodiody, powielacze fotoelektroniczne, układy fotodiod lub czujniki obrazu (CCD, CMOS itp.).

W rozdziale szóstym przeanalizowano możliwości systemów oprogramowania do uczenia głębokich sieci neuronowych. Obecnie stworzono dużą liczbę systemów oprogramowania do uczenia głębokich sieci neuronowych. Do najpopularniejszych należą Caffe, Theano, TensorFlow, Torch i CNTK. Biblioteka Caffe jest jednym z najwcześniejszych popularnych systemów głębokiego uczenia się. Została opracowana w Berkeley Vision and Learning Center i stała się oprogramowaniem



H. Rostkowski

typu open source w 2014 roku. Biblioteka Torch jest rozwijana w języku Lua i zapewnia wygodny interfejs wysokiego poziomu do tworzenia programów uczenia maszynowego, podobny do MATLAB-a. Wysoką wydajność, podobnie jak w Theano, zapewnia integracja z językiem C. Autorzy Torcha wybrali Lua zamiast Pythona ze względu na łatwość integracji C i Lua. Microsoft opracował system CNTK (Cognitive Toolkit) i stworzył jego kod źródłowy w 2016 roku. Wszystkie wymienione systemy sieci neuronowych głębokiego uczenia się mogą wykorzystywać zarówno procesory wielordzeniowe, jak i akceleratory GPU (w tym zoptymalizowaną bibliotekę cuDNN) w celu przyspieszenia uczenia. Co więcej, znaczącą zaletą jest to, że nie ma potrzeby ponownego opracowania programu, zrównoleglanie na CPU i GPU odbywa się automatycznie. Systemy Caffe i Theano dodatkowo obsługują akceleratory Intel Xeon Phi, które również pomagają znacznie skrócić czas uczenia głębokich sieci neuronowych. Prawie wszystkie systemy z wyjątkiem Theano mogą być wykorzystywane do rozproszonego uczenia sieci neuronowych w klastrach obliczeniowych.

Rozdział siódmy opisuje konstrukcję wielokanałowego światłowodowego systemu kontroli płomienia przeznaczonego do stosowania w środowiskach przemysłowych. Sygnały z czujników optycznych zawierają dużą ilość informacji, które mają niewielkie opóźnienie w sygnałach wejściowych i ich interpretacja jest bardzo trudna. Najprostsze czujniki wykrywania płomienia nie wymagają bardzo skomplikowanych metod analizy – wystarczy odpowiednie kryterium detekcji. Metody optyczne dostarczają jednak znacznie więcej informacji. Do diagnozowania procesu spalania można wykorzystać wiele charakterystyk sygnałów optycznych. Wstępnej selekcji tych cech pod względem istotności można dokonać stosując metodę analizy głównych składowych. Kolejnym wyzwaniem jest interpretacja danych. I wygląda na to, że metody sztucznej inteligencji sprawdzą się tutaj najlepiej.

Opracowano stanowisko laboratoryjne. Większość przedstawionych w tej części badań nad spalaniem paliw stałych przeprowadzono w Instytucie Energetyki w Warszawie. Jest to komora spalania z jedną komorą pyłową wykonana w skali 1:10 w stosunku do palnika przemysłowego o niskiej emisji i dystrybucji powietrza wtórnego. Obiekt został wybrany ze względu na możliwość eksperymentowania z jednym palnikiem i zadowalającym dozowaniem.

Stanowisko badawcze umożliwia ustalenie punktu odniesienia:

- prędkości przepływu powietrza;
- prędkości dostaw węgla.

Umożliwia pomiar następujących wielkości: natężenia przepływu wentylatora powietrza pierwotnego („młyn”);

- natężenia przepływu wentylatora powietrza wtórnego;
- prędkości przepływu z „trzeciego” wentylatora;
- ilości miazgi węglowej w zbiorniku (waga);
- średnią temperaturę w komorze;
- prędkości dostaw węgla;



Dr Róśdudko

- składu gazu w odległości 1 m od czoła palnika: O₂, CO i NO;
- składu gazu na wyjściu z komory spalania: O₂, CO, NO i SO₂ (analiza prowadzona jest przez dwa niezależne urządzenia);
- temperatury w charakterystycznych punktach.

Na podstawie tych wartości obliczone są następujące dane: przepływ powietrza w normalnych warunkach dla każdego przepływu; zużycie węgla.

Rozdział ósmy dotyczy opracowania oprogramowania i przetwarzania danych.

Należy zaznaczyć, że dane dotyczą okresu czasu, dlatego stosuje się metody TimeDistributed i 1D, gdyż dane prezentowane są w formie arkusza. MaxPooling służy do zmniejszania rozmiaru parametrów, a metoda Flatten służy do formatowania (przechodzenia) formularza do sieci neuronowej. Na Listingu 3 przedstawiono kombinację Conv i LSTM. Każdy model został przetestowany 10 razy, a wyniki przedstawiono w tabelach 8.1, 8.2 i 8.3. W tabelach można zobaczyć dwie metryki: dokładność i stratę (Accuracy i Loss). Accuracy obliczana jest w zakresie od 0 do 100, im bliżej 100, tym lepszy wynik. Natomiast funkcję Loss oblicza się w zakresie od 0 do określonej liczby, w tym przypadku im bliżej 0, tym lepiej. Wyniki pokazują, że model ConvLSTM sprawdza się bardzo dobrze w porównaniu z innymi modelami. Jeśli zwrócić uwagę na medianę i IQR, można powiedzieć, że większość wyników mieści się w przedziale od 85 do 99, a odchylenia są stosunkowo bardzo małe.

Rozdział dziewiąty poświęcony jest ogólnym wnioskom rozprawy. Niniejsza praca jest jedną z kilku prób rozwiązania problemu automatyzacji palników w układach spalania paliw niskowęglowych. Przy tym zastosowane głębokie sieci rekurencyjne zapewniają wysoką wydajność przy stosunkowo krótkim czasie przetwarzania, co pozwala na zastosowanie proponowanej metody w przemysłowych układach spalania. Niniejsza praca nie wyczerpuje zagadnień związanych z eksploatacją niskoemisyjnego palnika pyłowego. Dalsze kierunki badań autorki będą związane z rozszerzeniem opracowanej metody na palniki gazowe, gdyż na świecie panuje tendencja do stopniowego odchodzenia od spalania węgla.

Rozdział dziesiąty zawiera analizę literatury nowożytnej, na którą składają się 408 źródła w pełni skorelowane z tematyką badań prowadzonych w rozprawie.

5. Szczegółowe komentarze.

Teza, jak i cel pracy zostały sformułowane poprawnie i rzetelnie, nie budząc wątpliwości ani niedomówień.

Praca prowadzona jest konsekwentnie zgodnie z zamierzonym celem, co prowadzi do udowodnienia postawionej tezy. Przyjęta metodologia dowodu jest logiczna, gdyż prowadzona jest od określenia potrzeb i wymagań poprzez analizę, opracowanie metod i modeli matematycznych aż po zastosowania w nowoczesnych narzędziach modelowania.

Na pracę składają się stwierdzenia teoretyczne, modelowanie oraz badania praktyczne.



H. Rozanowska

Za dorobek własny autorki uważam:

- Zaproponowaną metodę identyfikacji niepożądanych warunków spalania, dla których współczynnik nadmiaru powietrza jest większy lub mniejszy od wartości zapewniającej całkowite spalanie;
- Propozycję możliwości implementacji architektury głębokich rekurencyjnych sieci neuronowych do klasyfikacji szeregów czasowych intensywności płomienia. Uzyskanie przy tym wyników, które posłużyły do budowy spłotowego modelu pamięci długotrwałej i krótkotrwałej, który zapewnił wysoką dokładność niezależnie od mocy cieplnej;
- Opracowaną opcję wykonania czujnika wykrywającego niepożądane tryby pracy palnika, co pozwala na większą selektywność i szybszą reakcję na wystąpienie takich stanów, a także zastosowanie algorytmów głębokiego uczenia się;
- Opisaną metodykę wstępnego przetwarzania i analizy sygnału.

Do wad pracy, które doktorantka powinna wyjaśnić, należą:

- Rozdział trzeci, czwarty i piąty są przeładowane dobrze znanymi informacjami, co utrudnia dostrzeżenie integralności pracy doktorskiej.
- Nie można w pełni prześledzić zgodności postawionych w rozprawie doktorskiej zadań z głównymi wnioskami.
- W celu podsumowania na końcu rozdziałów wykonanych badań wskazane byłoby wyciągnięcie krótkich wniosków na temat uzyskanych wyników;
- Celem pracy jest zwiększenie efektywności procesu monitorowania spalania miazgi węglowej przy wykorzystaniu ukierunkowania cech optycznych pozwalających na diagnozowanie procesu. Wskazane byłoby wprowadzenie w jednej z części pracy kryterium efektywnościowego.
- W pracy przeprowadzono badania procesów spalania z wykorzystaniem czujnika optycznego i głębokich sieci neuronowych. Dokładność rozpoznawania stanów awaryjnych została określona na większą niż 0,8. Metoda obliczeń nie jest do końca jasna.
- Na rys. 7.4 przedstawiono przedziały czasowe intensywności dla różnych współczynników nadmiaru powietrza. Pokazane są konkretne wartości X (0,65, 0,77, 0,85), a nie zakresy tych przedziałów.

Te mankamenty nie wpływają na ogólny odbiór rozprawy, który uważam za pozytywny.

6. Podsumowanie i wnioski.

Po zapoznaniu się z przedłożoną do oceny rozprawą doktorską stwierdzam, że:



H. Różańska

- udowodniono tezę rozprawy zaprezentowaną w rozdziale drugim;
- temat pracy jest aktualny, a wiedza teoretyczna i wyniki praktyczne są odpowiednio zestawione;
- rozprawa wskazuje na potrzebę i perspektywy przyszłych badań, mających na celu rozwiązanie problemów związanych z procesami diagnostyki spalania pyłu węglowego.

Z powyższego wynika, że doktorantka posiada kompetencje do samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz charakteryzuje się wystarczającą znajomością przedmiotu badan naukowych, przedstawionych w rozprawie.

W mojej ocenie doktorantka wykazała się umiejętnością sformułowania problemu, samodzielnego rozwiązania go oraz sprawdzenia jego przydatności, potwierdzając poprawność przyjętej teorii i narzędzi do jej realizacji. Zaplanowane prace zostały zakończone, a teza potwierdzona.

Reasumując stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Assel Mussabekovej zatytułowana „Wykorzystanie metod deep learning do diagnostyki procesu spalania pyłu węglowego” spełnia wymagania stawiane pracom promocyjnym na stopień doktora nauk technicznych w rozumieniu ustawy „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki” z dnia 14 marca 2003 roku, a Autorka może być dopuszczona do jej publicznej obrony.

[podpis] /recenzent/

Prof. dr hab. inż. Stanislav Tkachenko

Ja, mgr Halina Różańska, tłumacz przysięgły języka rosyjskiego, poświadczam zgodność powyższego tłumaczenia z okazanym mi skanem dokumentu w języku rosyjskim.

Tekst kursywą w kwadratowych nawiasach jest komentarzem tłumacza.

Lublin, dnia 21 września 2023 r.

Repertorium nr 642/2023



Halina Różańska