

**Dr hab. inż. Bronisław Andrzej KOLATOR, prof. uczelni**  
**Katedra Budowy, Eksploatacji Pojazdów i Maszyn**  
**Wydział Nauk Technicznych**  
**Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie**

## **RECENZJA**

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Aleksandrii Czajkowskiej**  
**pt. „Wykorzystanie fizykochemicznych miar procesów ewolucji stanu**  
**degradacji w diagnozowaniu obiektu złożonego”**  
**Promotor: prof. dr hab. inż. Bogdan Żółtowski**

Recenzję opracowałem na podstawie zlecenia z dnia 05 stycznia 2022 roku Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna prof. dr hab. inż. Dariusza Borońskiego. Przedłożona mi do oceny rozprawa doktorska została wdana drukiem przez Wydawnictwo Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy 2021.

### **Ocena problematyki pracy**

Wiele procesów przemysłowych, chemicznych i energetycznych w wyniku ich działania wytwarza niepożądane związki w postaci cząstek. Bardzo małe cząstki stałe rozproszone w powietrzu wykazują złożoną dynamikę, ze względu na ich charakterystykę ruchów Browna i niską szybkość sedymentacji, podczas gdy przemiany chemiczne i fizyczne w powietrzu mogą prowadzić do powstania związków stanowiących większe ryzyko. Aktualnie jednym z najbardziej wydajnych separatorów gaz-ciało stałe jest elektrofiltr (EF), oparty na ładowaniu elektrycznym cząstek i ich przyciąganiu do elektrod zbierających. Filtry elektrostatyczne (ESF) to wysoce wydajne i wszechstronne urządzenia do separacji gaz-ciało stałe w zastosowaniach obejmujących zapobieganie emisji cząstek do atmosfery poprzez zbierania nanocząstek i cząstek submikronowych rozproszonych w strumieniach gazów spalinowych.

W ocenianej rozprawie doktorskiej Autorka zajęła się problemem diagnozowania obiektu złożonego do wytrącania elektrostatycznego cząstek stałych z gazów spalinowych podczas procesu spalania paliw kopalnianych. Z punktu widzenia walorów poznawczych

i praktycznych należy uznać, że tematyka recenzowanej pracy doktorskiej jest ważna i aktualna. Biorąc pod uwagę opisane wymienione uwarunkowania uważam, że zarówno temat pracy jak i jej zakres zostały wybrane zasadnie i dotyczą bardzo ważnej tematyki mieszczącej się także w zakresie inżynierii mechanicznej.

Oceniana rozprawa zawiera podstawowe elementy pracy doktorskiej, ma charakter naukowo-badawczy, a także potencjał aplikacyjny. Rozprawa napisana jest językiem naukowym, a eksperymenty badawcze zostały przeprowadzone zgodnie z metodologią badań naukowych. Treść rozprawy doktorskiej jest zgodna z tytułem, proporcje oraz przyjęte rozdziały nie budzą zastrzeżeń. Cel rozprawy został spełniony, a wnioski znajdują potwierdzenie w opracowaniu wyników badań.

### **Analiza rozprawy doktorskiej**

Oceniana rozprawa doktorska przygotowana przez Panią mgr inż. Aleksandrę Czajkowską liczy łącznie 174 stron w tym 32 rysunki i 36 tabel (21 stron załączniki) i dotyczy problemu wykorzystania fizykochemicznych miar procesów ewolucji stanu degradacji w diagnozowaniu obiektu złożonego. Praca podzielona jest na 9 rozdziałów, poprzedzonych wykazem ważniejszych oznaczeń i symboli, a na końcu pracy znajduje się wykaz literatury (143 poz.) oraz streszczenie w języku polskim i angielskim. Układ ocenianej rozprawy jest poprawny i rozdziały są logicznie powiązane z sobą.

Rozdział 1 „**Wprowadzenie**” obejmuje ogólne informacje o elektrowniach, w których stosowane są paliwa kopalne. Doktorantka w rozdziale tym krótko przedstawia urządzenia do oczyszczania spalin, a w szczególności zanieczyszczeń pyłowo-gazowych oraz cel ich stosowania. Nadmienia również, że podstawowe zagadnienia i ważność stosowania metod umożliwiających na okresowy nadzór oraz monitorowanie zmian stanu technicznego urządzeń (odpylaczy elektrostatycznych) z wykorzystaniem wybranych miar fizykochemicznych, posłużył do analiz funkcjonowania obiektów (elektrofiltrów) w czasie procesu ich użytkowania, a ostatecznie diagnozowania obiektu złożonego.

Rozdział 2 „**Studium literaturowe tematu**” (s. 12-27), zawiera trzy podrozdziały:

**1. Elementy systemu eksploatacji obiektów technicznych**, Autorka przedstawia m.in. strukturę systemu eksploatacji z wyszczególnieniem procesu obsługi obiektu technicznego

**2. Funkcja sterująca diagnostyki w eksploatacji maszyn**, gdzie „sygnał wyjściowy systemu sterowania obiektem technicznych zawiera charakterystyki jakości systemu – mierzalny zbiór wielkości wyjściowych eksploatacji obiektu technicznego”. W rozdziale

pracy przedstawiono ten sygnał jako wektor wielkości wejściowych, który zawiera zdefiniowane funkcje cech stanu obiektu technicznego powiązanych z jego jakością funkcjonowania.

**3. Utrzymanie zdolności maszyn w energetyce**, w podsystemie wytwarzania energii elektrycznej dużą rolę odgrywa zachowanie niezawodnej pracy bloków energetycznych, gdzie w celu oszacowania aktualnego poziomu ich niezawodności wykorzystuje się wiele parametrów eksploatacyjnych m.in.; wskaźnik dyspozycyjności  $AF$ , średni obliczeniowy czas pracy bloku pomiędzy odstawieniami  $ART$ . Standardy emisji składników pyłowo-gazowych spalin ( $NO_x$ ,  $SO_x$  oraz pyłu), substancji znajdujących się w popiele lotnym i spalinach (Hg, HCl, HF, Pb, Cr, Cu, Mn, Ni, As, Cd, Tl, Sb, V, Co, dioksyny oraz furany) są aktualizowane od 2005 roku, a ostatnia zmiana progów nastąpiła w 2018 roku. Uwzględniając funkcję, jaką pełni odpylacz elektrostatyczny w całym procesie oczyszczania spalin, istotne jest zachowanie obiektu w niezawodnej pracy, w czasie jego eksploatacji.

W rozdziale 3 „**Problematyka rozprawy doktorskiej**” (s. 28-33), Doktorantka definiuje i uzasadnia problem badawczy, zwracając uwagę na szczególnie istotny problem ochrony środowiska naturalnego przed emisją zanieczyszczeń pochodzących z bloków energetycznych. W oparciu o wspomnianą problematykę Autorka opracowała cele rozprawy obejmujące eksploatację elektrofiltrów, a w szczególności ich diagnozowanie. W rozdziale tym przedstawiono również zakres pracy, w którym podano, że praca składa się z siedmiu rozdziałów, a jest dziewięć rozdziałów w spisie treści.

Rozdział 4 „**Racjonalna eksploatacja elementów bloku energetycznego**”, (s. 34-45) zawiera informacje na temat warunków eksploatacji, degradacji i ewolucji stanu elektrofiltru jako obiektu złożonego oraz jego analizy ryzyka i bezpieczeństwa. W rozdziale tym Doktorant przedstawia analizę funkcjonowania elektrofiltru nie zamieszczając ideowego schematu jego działania, powoduje to utrudnienie zrozumienia przytoczonych rysunków 4.1 i 4.2 i zależności (4.1-4.4).

Rozdział 5 „**Składowe procesu rozpoznawania stanu elektrofiltra**”, (s. 46-60), Autorka charakteryzuje obecnie stosowane procesy rozpoznawania stanu elektrofiltru opisując je w sposób jasny i zrozumiały. Następnie przedstawia procedurę ocenę stanu technicznego maszyny (elektrofiltru) i genezę stanu technicznego elektrofiltru (EF), wykonywanej podczas eksploatacji EF oraz prognozę jego stanu technicznego, która powinna zostać oparta na wartościach parametrów diagnostycznych, stanów obiektu w czasie eksploatacji oraz wykonanych modernizacji i napraw. Innowacyjnym podejściem jest

zastosowanie genezowania symptomowego, które umożliwi rejestrację wartości parametrów diagnostycznych EF oraz stanów EF w czasie eksploatacji. Algorytm procesu rozpoznawania stanu technicznego maszyny jest ostatnim podrozdziałem.

W kolejnym 6 rozdziale pracy pt. „**Metodyka badań**”, (s. 61-69), zawiera algorytm postępowania badawczego. W podrozdziale obiekt badań, Doktorantka opisuje zasadę działania EF (w oparciu o jeden widok, schemat – rys.6.3), brak identyfikacji obiektu badań. Zaprezentowane zestawienie wyposażenia pomiarowo-badawczego znajdującego się w firmie Energopomiar (tab. 6.1), ten podrozdział Autorka zatytułowała jako aparatura badawcza. Warunki realizacji eksperymentu, to badanie wielkości składników w popiele oraz gazach spalinowych zgodnie ze wskazanymi metodykami i normami (tab. 6.2). W rozdziale tym nie przedstawiono planu badań.

Rozdział 7 „**Wyniki badań i ich analiza statystyczna**”, (s. 70-112) zawiera cztery podrozdziały:

1 **Akwizycja i przetwarzania danych**, to wybrane zestawienia tabelaryczne parametrów fizykochemicznych z badanego okresu eksploatacji elektrofiltrów, (tab. 7.1 i 7.2, itd.) brak wyjaśnień co do liczby obiektów badań. Prezentacja wyników w tabelach jest mało czytelna.

2. **Tabelaryczne zestawienie wyników**, przedstawiono w tym podrozdziale (dopiero) sposób funkcjonowania elektrofiltru „Rys. 7.1. Struktura funkcjonalna oczyszczania spalin w systemie odpylania – elektrofiltr”. Zawarto jeden podpodrozdział „7.2.1. Algorytm wyznaczania testu kontroli stanu technicznego i lokalizacji uszkodzenia elementów w elektrofiltrze”, w którym jest barak logiki i spójności wywodów, np. „Dla grafu przedstawionego na Rysunku 13, składającego się z elementów krytycznych elektrofiltru ...” (s. 76).

3. **Opracowanie statystyczne wyników**, podrozdział ten zawiera pięć podrozdziałów: 3.1. Optymalizacja zbioru parametrów diagnostycznych; 3.2. Genezowanie wartości zbioru parametrów diagnostycznych za pomocą wybranych metod aproksymacji i interpolacji; 3.3. Określenie przyczyny wystąpienia stanu  $s_i(\mathbf{T}_{LU})$ ; 3.4. Wyznaczenie optymalnej metody prognozowania stanu technicznego elektrofiltru; 3.5. Wyznaczenie optymalnej metody szacowania terminu następnej obsługi elektrofiltru ( $\Theta_d$ ).

4. **Analiza wyników**, została przeprowadzona na podstawie parametrów diagnostycznych poszczególnych komponentów elektrofiltru ze wskazaniem rekomendowanych działań i okresów obsługi.

W rozdziale tym przedstawiono zestawienia parametrów fizykochemicznych (SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub> – trzy tabele) oraz stężenia pyłu, temperatury gazu w kanale, wydajności kotła, wilgotności spalin, strumienia objętości gazu oraz temperatury wodnego punktu rosy. Według Doktorantki, przygotowane dane stanowiły podstawę do przeprowadzenia procesu rozpoznawania stanu technicznego elektrofiltru. Mankamentem tego rozdziału jest sposób prezentacji tabel i rysunków. Zamieszczenie tak małych tabel i rysunków sprawia, że mogą być one zupełnie nieczytelne i niezrozumiałe dla odbiorcy.

Kolejny 8 rozdział pracy „**Ocena eksploatacji obiektów złożonych**” (s. 113-136), jest prezentacją wskaźników eksploatacji maszyn (OEE) i analizy SWOT z uwzględnieniem czynników strategicznych charakteryzujących proces eksploatacji elektrofiltrów oraz analizy rodzajów i skutków możliwych błędów – metoda FMEA, a także przesłanek do modernizacji eksploatacji obiektu.

Rozdział 9 pracy „**Zakończenia i wnioski**”, (s. 137-141) stanowi podsumowanie pracy. Autorka stwierdza, że przeprowadzone etapy pozwoliły na zweryfikowanie postawionej hipotezy badawczej oraz przedstawiła szczegółowe zalecenia dla systemu rejestracji awarii, z uwzględnieniem lokalizacji uszkodzeń w odpylaczu elektrostatycznym. Możliwe było prawidłowe zidentyfikowanie 7 parametrów diagnostycznych, które w dalszej części stanowiły podstawę do przeprowadzenia genezy i prognozy stanu technicznego elektrofiltru. Na podstawie analizy przeprowadzonych badań, Doktorantka wskazała kolejne obszary działania, które należałoby w dalszej kolejności dokładnie zgłębić bądź zrealizować, m.in. zaproponowała aktualizację paneli sterowania elektrofiltrami o nowe parametry diagnostyczne.

Zasadniczą część pracy kończy wykaz literatury, streszczenie w języku polskim i angielskim oraz załączniki.

### **Ocena merytoryczna rozprawy**

Wybór tematu rozprawy doktorskiej należy uznać za bardzo trafny i aktualny, mieszczący się we współczesnych trendach ochrony środowiska. Pani **mgr inż. Aleksandra Czajkowska**, Autorka rozprawy podjęła się próby identyfikacji przyczyn pojawiania się uszkodzeń elementów krytycznych w EF oraz określenia i analizy niezbędnych parametrów

fizykochemicznych w procesie diagnozowania stanu technicznego odpylaczy elektrostatycznych.

W oparciu o dokonane studium literaturowe Autorka sformułowała cel pracy, którego istota sprowadza się do wyboru parametrów stanu określających zależność pomiędzy rozwijającymi się uszkodzeniami elektrofiltru, a zmianami miar stanu urządzenia, a także opracowania procedur rozpoznawania stanu technicznego elektrofiltru i lokalizacji uszkodzeń. Celami dodatkowymi było przedstawienie zaleceń dla systemu rejestracji uszkodzeń EF, określenie częstotliwości i zakresów czynności realizacji przeglądów obiektu dla strategii eksploatacji elektrofiltrów według stanu technicznego oraz doświadczalne zbadanie opracowanego algorytmu diagnozowania.

Doktorantka postawiła oryginalną hipotezę pracy **„Możliwe jest dozоровanie i wskazywanie zmian stanu technicznego elektrofiltru, bazując na analizie miar fizykochemicznych ewolucji procesu degradacji obiektu złożonego”**.

Z postawionej hipotezy wynikał cel, zakres pracy i zasady dla proaktywnego diagnozowania stanu technicznego odpylaczy elektrostatycznych, bazującego na ocenie systemu eksploatacji elektrofiltrów, w oparciu o wybrane wskaźniki efektywności i jakości.

Oceniana rozprawa ma poprawną strukturę typową dla prac doktorskich, poszczególne rozdziały są kompletne i na ogół nie wymagają uzupełnienia, choć forma prezentacji tabel i rysunków (małe wymiary) jest często nieczytelna.

Podsumowując, moim zdaniem rozprawa posiada pewne mankamenty i usterki, z których niektóre mają charakter dyskusyjny. Dlatego chciałbym przedstawić Autorce kilka uwag natury ogólnej, szczegółowej i redakcyjnej, do których należą:

1. Tekst zawarty w opisie zakresu pracy dotyczący numerów poszczególnych rozdziałów nieodpowiednio odnosi się do ich numerów wykazanych w spisie treści.
2. W podrozdziale 4.1 Eksploatacja elektrofiltrów, przedstawiono, że „Standardy emisji pyłów zostały omówione w podrozdziale 2.3. dotyczącym utrzymania maszyn w zdadności w energetyce.”, powinno być wskazane bliżej, patrz tabele 2.3-2.5. Moim zdaniem w tym podrozdziale nie przedstawiono budowy (schematu) i istoty funkcjonowania elektrofiltru, a przeprowadzono wywody niepoprawnej jego pracy. „Rysunek 4.2, w części „b” prezentuje charakterystyki prądowo-napięciowe dla poprawnej pracy elektrofiltru w każdej strefie odpylania spalin.”, w pracy nie ustosunkowano się do kolejnych stref odpylania EF, na rys. 8.3 przedstawiono trzy strefy odpylania – bez komentarza. W nie odpowiedniej kolejności przedstawiono charakterystyki prądowo-napięciowych (rys. 4.2) i ustosunkowano się do ich analizy,

a według mnie poszczególne zmiany prądowo-napięciowe mogą być przydatnym narzędziem diagnostycznym. Zamieszczone równania 4.1-4.4 moim zdaniem są zbędne, a ich oznaczenia i edycja są mało poprawne, a także jest brak wykorzystania tych zależności w pracy.

3. Rozdział 6. Metodyka badań, jest przedstawiony w bardzo syntetyczny opis, obiekt badań - zawierający mało czytelny schemat „Rys. 6.3. Zasada działania elektrofiltru”, a początek tego podrozdziału rozpoczyna się od „Zasada działania elektrofiltrów opiera się na wykorzystaniu oddziaływania pola elektrostatycznego na cząsteczki ciał stałych tabelaryczne, ...”, identyfikacja obiektu badań jest bardzo uboga. Aparatura badawcza to zestawienie wyposażenia pomiarowo-badawczego znajdującego się w firmie Energopomiar (tab. 6.1), jest wyszczególnienie 11 pozycji bez wskazania miejsca i liczby wykorzystanej do badań oraz rejestracji i archiwizacji wyników badań. Warunki realizacji eksperymentu oparto o zestaw norm (tab. 6.2, 14 poz.), bez objaśnień i komentarzy Autorki, natomiast przytoczono siedem zależności przeliczenia mierzonych wskaźników emisji zanieczyszczeń – moim zdaniem zbędnych, również bez wyjaśnień. Reasumując, treści tego rozdziału powodują pewien niedosyt szczegółów w tym zakresie.
4. W podrozdziale 7.1 Akwizycja i przetwarzania danych, Autorka podaje, że „Przygotowanie danych do dalszej analizy polegało w pierwszej kolejności na zebraniu wartości parametrów fizykochemicznych dla 5 elektrofiltrów, uzyskanych w latach 2008-2019.” Na podstawie przykładowych wyników badań (tab. 7.1-7.3, wyniki bardzo mało czytelne), gdzie przedstawiono wartości czterech związków chemicznych, a dalszych rozważaniach są tylko dwa. Jaki była logika i sens porównywania wartości parametrów fizykochemicznych z zakresu czasowego 11 lat? Czy dane w tabelach 7.4-7.6 mogły stanowić podstawę do drugiego etapu przeprowadzenia procesu rozpoznawania stanu technicznego? Do wykonania testu kontroli stanu technicznego i lokalizacji uszkodzenia w elektrofiltrze wskazano czternaście parametrów diagnostycznych, a w tabelach przedstawiono siedem. Na jakiej podstawie opracowano macierz stanu (14k x 14w) systemu odpylania? Jaki był sens logiczny genezowania wartości zbioru parametru diagnostycznego  $y_1$ , dla elektrofiltru nr 1, skoro „błąd genezowania” przy wykorzystaniu różnych metod aproksymacji przekraczał 100%? Analiza wyników badań przedstawiona w podrozdziale 7.4, sprowadza się do podziału i opisu poszczególnych komponentów obiektu oraz raportu kontroli i przeglądów mechanicznych elektrofiltrów.

5. „W pracy przedstawiono również aspekt finansowy, poprzez wskazanie przykładowego zestawienia kosztów modernizacji elektrofiltru, która została przeprowadzona w 2018 roku (tab. 8.4).” – jakie jest uzasadnienie przedstawionych zagadnień w pracy?

### **Uwagi szczegółowe**

Czytając tekst rozprawy zauważyłem dość liczne błędy słowne, gramatyczne, stylistyczne m.in.:

- s. 5. Spis treści – podpunkt 2.2 nie zgodny z tytułem podrozdziału 2.2 (s. 15);
- s. 5. Spis treści – punkt 6. nie zamieszczono tytułów podrozdziałów 6.1 – 6.4;
- s. 6. Spis treści – nie uwzględniono rozdziału Załączniki;
- s. 7. Wykaz ważniejszych oznaczeń i symboli – nieuporządkowane oznaczenia, edycja tekstu i symboli, akronimy, nie uwzględniono wielu oznaczeń;
- s. 32. (w. 5) – po wyrazie diagnostyki użyto akronimu „Dt”, moim rozumieniu zbędnie;
- s. 36. (rys. 4.2b) – nieodpowiednio oznaczone „PRZESKOKI”;
- s. 66. (tab. 6.1) – brak oznaczenia akronimów WPB, CRM i objaśnień jednostek poszczególnych wielkości pomiarowych, powoduje nieczytelność tej tabeli;
- s. 70 i 71. (tab. 7.1-7.3) – wielkości i ich wartości nieczytelne (mała czcionka), podano różne dokładności wartości;
- s. 72. (tab. 7.4, 7.5) – brak jednostek poszczególnych wielkości, mała czcionka;
- s. 72. (tab. 7.6) – czy poprawna jest jednostka wydajności kotła [ $\text{th}^{-1}$ ]?, ostatnia kolumna jest zbędna – zawiera we wszystkich wierszach tą samą wartość;
- s. 76. (w. 13 od dołu) – jest „Dla grafu przedstawionego na Rysunku 13, ...” nie ma w pracy rys. 13 i żadnego grafu;
- s. 77. (tab. 7.7) – logika wywodów do treści w tej tabeli jest mało przejrzysta i czytelna;
- s. 78-80. (tab. 7.8, 7.9) – są nieczytelne;
- s. 82 (w. 2 od dołu) – jest „W załącznikach A i B zostały wskazane przykładowe parametry, ...” dane przedstawione w załącznikach są nieczytelne, pomimo dwukrotnego powiększenia;
- s. 86, 88. (rys. 7.2, 7.3) – niejasne sformułowanie tytułów rysunków, krzywych, legend i treści;



- s. 89. (rys. 7.4) – brak oznaczenia tytułów osi, bardzo mała czcionka – rysunek nieczytelny;
- s. 121. (rys. 8.1) – nieczytelne czynniki na rysunku;
- s. 138. (w. 4 od dołu) – „ ... możliwe było prawidłowe zidentyfikowanie 7 parametrów diagnostycznych” dalej czytając „Wyróżnione zostały poniższe miary fizykochemiczne:” w liczbie osiem.

## **Konkluzja**

Zawarte w mojej recenzji uwagi krytyczne nie wpływają jednak na ogólną pozytywną ocenę rozprawy, a często uwagi te mają charakter dyskusyjny.

Doktorantka niewątpliwie w trakcie realizacji pracy wykazała się umiejętnością prowadzenia badań naukowych z wykorzystaniem zarówno aparatury pomiarowej jak i komputerowych programów umożliwiających prowadzenie złożonych analiz inżynierskich.

Biorąc zatem pod uwagę omówione i ocenione wyżej rezultaty rozprawy doktorskiej stwierdzam, iż rozprawa doktorska **mgr inż. Aleksandry Czajkowskiej pt. „Wykorzystanie fizykochemicznych miar procesów ewolucji stanu degradacji w diagnozowaniu obiektu złożonego”** spełnia wymogi stawiane pracom na stopień doktora nauk technicznych, w rozumieniu przepisów wprowadzających ustawę – Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. 2018 poz. 1669) oraz ustawy z dnia 14.03.2003r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) wnioskuje zatem o **dopuszczenie Pani mgr inż. Aleksandry Czajkowskiej do publicznej obrony przedstawionej rozprawy doktorskiej.**

*Bronisław Kolator*