

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Puzio pt.:
**„PREDYKCYJNE MONITOROWANIE EMISJI SPALIN Z WYKORZYSTANIEM
CZUJNIKÓW TLENU W CZASIE RZECZYWISTYM”**

Promotor: *prof. dr hab. inż. Ryszard WÓJCIK*

Promotor pomocniczy: *dr inż. Aleksandra Radomska-Zalas*

Podstawa opracowania: pismo KD-541-3.2025.JK z dnia 24 kwietnia 2025 roku

Pana Przewodniczącego Komisji Doktorskiej

Prof. dr. hab. inż. Mirosława Urbaniaka

1. Wstęp

Problematyka związana z obciążaniem środowiska naturalnego przez pojazdy zasilane silnikami spalinowymi jest powszechnie znana. Obecnie trwają intensywne prace badawcze nad metodami ograniczania a nawet wyeliminowania emisji trujących składników spalin i gazów cieplarnianych. Regulacje prawne wprowadzane przez UE jednoznacznie preferują napędy elektryczne. Niestety mają one zasadniczą wadę: gęstość energii zgromadzonej w akumulatorze pojazdu jest ok. 80 krotnie mniejsza w porównaniu do gęstości paliw kopalnianych. Ponadto wytwarzanie energii elektrycznej ciągle wiąże się z zanieczyszczaniem środowiska naturalnego. W ostatnim czasie pojawia się wiele doniesień naukowych o rozwiązaniach poprawiających parametry eksploatacyjne akumulatorów ale postęp jest ciągle niewystarczający. Co najmniej przez okres kolejnych 10-ciu lat będziemy skazani na silniki spalinowe i poszukiwanie rozwiązań zmniejszających ich wpływu na środowisko naturalne.

Czujniki tlenu odgrywają zasadniczą rolę w regulacji składu mieszanki paliwowo-powietrznej w silnikach z zapłonem iskrowym. Monitorowanie poziomu tlenu w spalinach pozwala optymalizować proces spalania, a to bezpośrednio wpływa na emisję szkodliwych substancji w spalinach. Ponad to wraz z rosnącym zainteresowaniem paliwami alternatywnymi (LPG, CNG, wodór, e-paliwa) konieczne jest ciągle rozwijanie metod monitorowania emisji spalin w tym monitorowania w zmiennych warunkach rzeczywistego ruchu drogowego.

W świetle powyższego podjęcie przez Doktoranta badań mających na celu opracowanie metodyki i narzędzia do dynamicznego monitorowania i predykcji emisji toksycznych składników spalin w oparciu o powszechnie stosowane sondy lambda uważam za wartościowe i w pełni uzasadnione.

2. Zakres i charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska składa się z 8 zasadniczych rozdziałów, wprowadzenia, wykazu literatury (178 pozycji), spisu tabel i rysunków oraz załącznika. W pracy zamieszczono streszczenie w języku polskim i angielskim. Rozprawa obejmuje 185 stron w tym 154 stronach zasadniczej części pracy.

W sześciostronicowym **wprowadzeniu** Doktorant w sposób syntetyczny opisuje znaczenie kontroli emisji spalin i ochrony środowiska ponadto przedstawia zawartości poszczególnych rozdziałów pracy. Rozdział zakończono streszczeniem w Języku angielskim i polskim.

W rozdziale 1 – analiza stanu wiedzy (s.12-s.37) Doktorant szczegółowo omawia emisję zanieczyszczeń oraz smogu. Głównie koncentruje się nad zanieczyszczeniami powietrza pyłami zawieszonymi. Zdawkowo wspomina o azotanach, i innych zanieczyszczeniach. W dalszej kolejności omawia systemy telemetryczne i pomiar emisji spalin. Telemetrii Autor poświęca kilka zdań z których wynika, że literatura na ten temat jest skąpa a problem pomiaru i przesyłania danych jest skomplikowany i wymaga dalszych prac badawczych.

W podrozdziale 1.2. „Systemy telemetryczne i pomiar emisji spalin”, Autor analizuje wpływ: infrastruktury drogowej, stylu jazdy, przebytej trasy, charakterystyki eksploatacji pojazdu i stanu technicznego pojazdu na emisję toksycznych składników spalin. Treści te są bardzo luźno związane z tytułem podrozdziału. Moim zdaniem należało je umieścić w rozdziale poświęconemu emisji spalin. Doktorant omawia wpływ czynników związanych z infrastrukturą drogową, obiektem technicznym i człowiekiem (kierowca) na wielkości emisji spalin. Nic nie wspomina o aparaturze i metodyce pomiaru emisji a sednem rozdziału są „Systemy telemetryczne i pomiar emisji spalin”. Za to podrozdziały nienumerowane:

- Korelacje, predykcja
- Diagnostyka
- Sonda lambda

Ściśle dotyczą tematyki sugerowanej w tytule rozdziału. W podrozdziale pt. „Korelacje, predykcja” Autor analizuje dwie prace związane z modelowaniem emisji spalin. Analiza i wnioski wyciągane przez autora są na ogólnym, poziomie, mimo, że autorzy prezentują ciekawe badania i spostrzeżenia. W podrozdziale pt. „Diagnostyka” analizowane są trzy prace związane z diagnostyką pokładową pojazdów. W podrozdziale pt. „Sonda Lambda” Autor analizuje osiem prac związanych z badaniami i rozwojem konstrukcji sond lambda. Wnioski płynące z tych analiz sprowadzają się do stwierdzenia, że sonda jest istotnym elementem układu sterowania silnikiem i regulacji ilości emisji spalin i w jej rozwoju tkwi potencjał do ograniczania emisji.

Rozdział 2 - akty prawne regulujące normy emisji spalin i cykle badawcze (s.38 -s. 50) Doktorant podzielił na sześć podrozdziałów które poprzedza obszerny wstęp. We wstępie Autor przytacza europejskie akty prawne dotyczące homologacji pojazdów silnikowych. Podsumowuje rozdział wymaganiami dla producentów i krajowych organów kontrolnych. Pozostałe podrozdziały zatytułowano:

- Normy Euro
- Cykl badań, NEDC (New European Driving Cycle)
- Cykl badań, WLTP – RDE (World Harmonized Light Vehicle Test Procedure)
- Green NCAP
- Niektóre niedozwolone praktyki producentów samochodów
- Złożoność problemu procedur testowania silników pod kątem emisji spalin

Podrozdział **Norma Euro** zakończony został trafną uwagą Autora o potrzebie ograniczania poziomów emisji innych gazów (amoniak, podtlenek azotu). Również uwagę Autora, że kontroli powinien podlegać cały zakres emisji cząstek PM należy uznać za słuszną.

Cykle jazdy lepiej jest przedstawić za pomocą wykresów obrazujących funkcyjne zależności parametrów jazdy od czasu cyklu. Doktorant zastosował opis który utrudnia zrozumienie przebiegu cyklu. Omawianie niedozwolonych praktyk producentów samochodów niewiele wnosi do pracy. Pominięcie tych zagadnień byłoby niezauważalne.

W podrozdziale pt. „Złożoność problemu procedur testowania silników pod kątem emisji spalin” Autor omawia procedury testowania silników pod kątem emisji spalin. Zagadnienie było już poruszane w rozdziale pierwszym pracy. Niepotrzebnie Autor ponownie do tego wraca.

Rozdział 3 - urządzenia kontrolno-pomiarowe wykorzystywane w pomiarach emisji spalin (s.50 – s.64) Autor podzielił na podrozdziały: **Analizatory GUM** - w którym wymienia firmy których analizatory zostały zatwierdzone przez Główny Urząd Miar i wprowadzone na rynek polski między 1994 a 2006 rokiem; **Analizatory MDI** - tu wyjaśnia nazwę i przytacza listę producentów oraz podrozdział **Urządzenia mobilne (PEMS)** – tu omawia historię rozwoju tego typu urządzeń. Wiedza zawarta w rozdziale nie wnosi niczego istotnego do pracy, jest dość ogólna.

W rozdziale 4 - sondy lambda (s.55-s.66), autor szczegółowo omawia budowę i tendencje rozwojowe konstrukcji współczesnych sond lambda.

Rozdział 5 - cel teza i zakres pracy (s.64-s.65)

Autor jasno sformułował cel, hipotezę i tezę pracy. *„Celem głównym rozprawy jest opracowanie, wdrożenie oraz weryfikacja modelu predykcyjnego szacowania poziomu emisji spalin silnika o zapłonie iskrowym z wykorzystaniem napięcia sondy lambda oraz algorytmów predykcyjnych”.*

Hipoteza badawcza:

„Istnieje możliwość uzyskania wyraźnie wyższej skuteczności identyfikacji pojazdów o ponadnormatywnej emisji toksycznych składników spalin oraz przyczyn nadmiernej emisji zanieczyszczeń emitowanych przez silniki o zapłonie iskrowym dzięki połączeniu analizy w czasie rzeczywistym sygnałów z pokładowych sond lambda oraz jednoczesnego monitorowania parametrów pracy silnika wspomaganą algorytmami predykcyjnymi, co umożliwi szybką ocenę stanu technicznego układu wydechowego, predykcyjne wykrywanie potencjalnych usterek oraz redukcję emisji podczas codziennej eksploatacji pojazdu.

W pracy weryfikuje się wyżej wymienioną hipotezę w badaniach przeprowadzonych w warunkach rzeczywistej eksploatacji pojazdów wyposażonych w silniki o zapłonie iskrowym.”

Teza pracy:

„Wdrożenie mobilnego systemu opartego na czujnikach tlenu (sondach lambda) oraz układach telemetrycznych realizujących pomiary w czasie rzeczywistym, pozwoli na sprawne i skuteczne monitorowanie składu spalin w warunkach trakcyjnych, co istotnie może wspomagać wczesne wykrywanie pojazdów przekraczających normy emisji i przyczynić się może do ograniczenia negatywnego oddziaływania transportu drogowego na środowisko naturalne”.

Przedstawione hipotezy dotyczą problemów emisji spalin pojazdów samochodowych napędzanych silnikami z zapłonem iskrowym. Hipotezom przyporządkowano cel pracy i zakres niezbędnych do wykonania badań. Cel polegający na wdrożeniu rozwiązania uważam za cel zbyt ambitny.

Autor kończy rozdział akapitem poświęconym szkodliwości trujących składników spalin. O tym była już mowa w rozdziałach poprzednich. Bezcelowe jest powtarzanie takich informacji w rozdziale dotyczącym też pracy.

Rozdział 6 - wyznaczanie podstawowych parametrów niezbędnych do budowy algorytmu predykcyjnego (s.66-s.78). Autor treści rozdziału uzasadnia koniecznością:

- Zamiany jednostek emisji składników spalin (g/km na ppm lub %), oraz
- Konieczność dostarczenia odpowiednich danych dla algorytmów predykcyjnych

Rozdział ma charakter porządkowania wiedzy na temat procesów chemicznych zachodzących podczas spalania paliw w silnikach spalinowych spalania wewnętrznego i reakcjach zachodzących w katalizatorach spalin. Doktorant podzielił cały rozdział na następujące podrozdziały:

- Obliczenia emisji w warunkach zachowania stechiometrii procesu spalania
- Wpływ rodzaju paliwa na osiągnięte wyniki
- Teoretyczne zapotrzebowanie na powietrze
- Skład chemiczny spalin
- Toksyczne składniki spalin
- Powstawanie tlenków azotu
- Formowanie się tlenku węgla
- Powstawanie węglowodorów
- Reakcje w trójfunkcyjnym konwerterze katalitycznym (TWC)
- Test sprawności katalizatora

Doprecyzowaniu wymaga które z opisywanych parametrów będą wykorzystywane do budowy algorytmu predykcyjnego, to nie jest jasne?

Rozdział 7 - Mobilny system telemetryczny (s.79-s.96)

W obszernym wstępie do rozdziału doktorant omawia zalety systemu OBM (On Board Monitoring) a następnie przedstawia stworzony przez siebie mobilny system monitorowania emisji CO. Rozsądniej byłoby opis systemu OBM zawrzeć w rozdziale trzecim gdzie były omawiane urządzenia wykorzystywane do monitorowania i pomiarów emisji spalin.

W jakim celu Autor zajmuje się w rozprawie mobilnym system monitorowania CO. Po co omawia konstrukcję mobilnej sondy zawartości tlenku węgla (CO) i po co przedstawia badania dotyczące pomiarów emisji CO? Pomiar zawartości CO w żaden sposób nie wpisuje się w cel i tezę pracy. Wątpliwe jest także wykorzystanie opracowanego interfejsu do osiągnięcia założonego celu. Czy przedstawiony w podrozdziale 7.2. System telemetryczny monitorowania sond lambda jest tożsamy z mobilnym systemem monitorowania CO? To wymaga wyjaśnienia. Z rysunku 35 (Diagram obrazujący architekturę systemu telemetrycznego) wynika, że wszelkie dane będą pozyskiwane z sieci CAN a Doktorant pisze, że dzięki zastosowaniu opisywanego rozwiązania uzyskano możliwość ciągłego monitorowania emisji CO₂, O₂, CO, HC i NO_x. Jeśli by tak było to nie istniałaby konieczność budowy algorytmów predykcyjnych i badania zależności pomiędzy napięciem sondy lambda a wielkością emisji poszczególnych składników spalin?

Na str. 95 w ostatnim akapicie autor pisze: „Weryfikacja działania rozwiązania systemu telemetrycznego monitorowania sond lambda została przeprowadzona na rzeczywistych obiektach samochodowych różnych marek. Badania weryfikacyjne realizowano Wykorzystujących bezpośredni montaż na rurze wydechowej samochodu z wykorzystaniem elastycznego reduktora pozwalającego przeprowadzić montaż na różnych średnicach rur wydechowych.” Nie wiadomo co Autor chciał w tym zdaniu powiedzieć, to wymaga wyjaśnienia?

Rozdział 8 - procedura badawcza (s.97-s.135)

W pierwszym akapicie Autor omawia autorski system monitorowania emisji spalin. Autor pisze: „System ten bazuje na przetwarzaniu i interpretacji sygnałów pochodzących z sond lambda oraz dodatkowych czujników wspierających analizę warunków pracy silnika.” Autor nie mówi jakie dodatkowe czujniki ma na myśli. Ta kwestia wymaga wyjaśnienia bo dotąd mowa była tylko o sondach lambda, jakie czujniki będą jeszcze wykorzystywane i w jaki sposób?

W drugim akapicie Doktorant mówi: „Końcowym etapem przedstawionej metodyki badań jest weryfikacja uzyskanych danych za pomocą analizatora spalin.” Dotąd doktorant nie opisał sposobu prowadzenia badań. Czy dane o których pisze autor to emisja wytypowanych składników spalin i to one będą weryfikowane? W pracy trudno jest znaleźć opisu metody weryfikacji. Jak przeprowadzono tą weryfikację?

W tym samym akapicie na str. 98 autor pisze: „Wobec powyższego plan badań z wykorzystaniem opracowanego systemu telemetrycznego, mobilnej sondy CO, mobilnych i stacjonarnych analizatorów spalin oraz systemu akwizycji danych z OBD pojazdu ma” koniec cytatu, urwane zdanie, jak to rozumieć? W dalszej kolejności wymieniane są punkty: 1. Cel badań, 2. Zakres badań, 3. Metodyka badań itd. W podpunkcie trzecim (metodyka badań) Doktorant precyzuje metodykę badań. Wymienia od myślnika:

- „Badania wstępne – główny cel badań weryfikacja poprawności działania systemu dynamicznego pomiaru CO oraz poprawności działania systemu telemetrycznego monitorowania sond lambda,
- Synchronizacja zastosowanych układów pomiarowych,”

Punkt pierwszy i drugi tego wyliczania, dotyczy całej pracy. Zatem można domniemywać, że metodyka badań dotyczy również całej pracy a omawiane są badania wstępne. Jak to rozumieć, proszę o wyjaśnienie? Jak prowadzono badania czy w trakcie jazd testowych jednocześnie rejestrowano sygnały z sond lambda i pomiary emisji spalin z analizatora spalin i na tej podstawie opracowywano algorytm predykcyjny? W pracy nie wyjaśniono tego w sposób przekonujący.

W podrozdziale 8.2 - Opis stanowiska badawczego, Doktorant w akapicie pierwszym informuje, że: „Badania wykonano w trakcie jazd i codziennej eksploatacji pojazdów oraz na Stacji Kontroli Pojazdów SKP FG/08/Pw. Badania na SKP przeprowadzono zgodnie z wymogami zawartymi w Dzienniku ustaw z dnia 10 czerwca 2015r. w sprawie zakresu i sposobu przeprowadzania badań technicznych pojazdów oraz wzorów dokumentów stosowanych przy tych badaniach. – Załącznik nr. 1 do ustawy.” Moim zdaniem jest to element programu badań i tekst należało umieścić w rozdziale dotyczącym programu badań.

Nie rozumiała jest potrzeba badań na SKP zgodnie ze stosownymi wytycznymi z dziennika ustaw. Metodyka tych badań nie w pełni odzwierciedla eksploatację w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego. Dotychczasowy brak szczegółowego opisu programu badań utrudnia zrozumienie potrzeby tych badań. Proszę o wyjaśnienie tej kwestii? Również nie jest jasne do jakich badań był wykorzystywano diagnostykę Bosch KTS 560?

Opis sposobu synchronizacji układu pomiarowego pokazany na rys 45 i 46 jest mało czytelny i niezrozumiały, w jakich warunkach prowadzono pomiary i jak kalibrowano układ pomiarowy?

Podrozdział 8.4. przykładowe wyniki badań zorganizowano w postaci obszernego bo zajmującego aż 7 stron, wprowadzenia teoretycznego i dwóch numerowanych podrozdziałów:

- Badania drogowe. Przejazdy testowe – Renault Modus
- Badania drogowe. Przejazdy testowe – Fiat Punto

Nie jest jasne których pojazdów dotyczą dane pomiarowe umieszczone we wstępie. Np. których pojazdów dotyczy tabela nr 9 - „Wartości zmierzonych emisji” i tabela nr 10 - ”Szacowana emisja dla wartości $\lambda = 1,07$ ”? Podobne wątpliwości nasuwają się przy analizie tabeli 11 pt. ”Wartości zmierzonych emisji”. Czy to są wyniki badań, dlaczego je umieszczono we wstępie?

W kolejnych podrozdziałach na rys. 50, 51, 52, 53, 56, 57, 58, 59, autor przedstawia różne charakterystyki napięciowe sond lambda. Charakterystyka czujnika to graficzny opis jego właściwości. Co zatem autor miał na myśli? Które wykresy to wyniki badań a które to wyniki obliczeń? Jaki jest związek pomiędzy napięciem generowanym przez sondę lambda a emisją poszczególnych zanieczyszczeń, jak to zweryfikowano?

Tytuł rozdziału sugeruje selekcję wyników badań i zaprezentowanie jakiś wybranych, przykładowych wyników. Powstaje pytanie: Jakie kryteria przyjął autor do wyboru wyników przykładowych, dlaczego nie uwzględnił wszystkich wyników i nie dokonał stosownej analizy statystycznej?

W podrozdziale 8.5. Weryfikacja otrzymanych wyników pomiarów doktorant dokonuje obliczeń różnych parametrów dotyczących procesu spalania paliw w iskrowych silnikach spalania wewnętrznego. Podaje tylko jeden przykład na weryfikację emisji CO.

Na str. 133 w podpunkcie 8.5.5 w akapicie pt. Przykład weryfikacyjny dla emisji CO (pojazd P2, Tabela 13), Autor oblicza emisję CO i porównuje z danymi zawartymi w tabeli 13 na str. 128. W tabeli nr 13 trudno jest odnaleźć dane do weryfikacji. Jak ta emisja została zweryfikowana i czy emisje pozostałych składników spalin były weryfikowane?

Rozdział podsumowujący pracę (s.136-s.140) jest zwięzłym podsumowaniem efektów badań osiągniętych przez Doktoranta. Każdy z ze sformułowanych wniosków poznawczych i użytkowych został uzupełniony odpowiednim komentarzem.

We wnioskach poznawczych Doktorant między innymi stwierdza, że:

- sformułowano zależności między emisją CO, HC, NOX a napięciem diagnostycznej sondy lambda,
- zmiany napięcia sondy są silnie skorelowane z poziomami emisji badanych związków,

We wnioskach użytkowych Doktorant podaje, że:

- istnieje możliwość opracowania mobilnego i zarazem ekonomicznego systemu pozwalającego na bieżąco oceniać rzeczywisty stan emisji spalin w pojazdach z silnikami ZI.

W propozycji dalszych badań Doktorant sugeruje aby:

- włączyć do projektowanego układu dodatkowych sensorów, w szczególności umożliwiających pomiar NOx i cząstek stałych (PM), co pozwoli na bardziej całościową ocenę emisji w przypadku silników wysokoprężnych,
- zaimplementować metody uczenia maszynowego, do analiz złożonych zbiorów danych pochodzących z rejestracji drogowych,
- dane z pomiarów emisji spalin przesyłać w czasie rzeczywistym do centralnych baz danych, co pozwoliłoby na szybkie wychwytywanie pojazdów znacząco przekraczających normy emisji oraz przyczyniłoby się do tworzenia bardziej zaawansowanych strategii ograniczania zanieczyszczeń w miastach.

3. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej

Przedstawiona rozprawa doktorska należy do aktualnego i ważnego obszaru badawczego związanego z budową i eksploatacją pojazdów samochodowych napędzanych spalinowymi silnikami z zapłonem iskrowym. Zaproponowane wykorzystanie sygnałów z czujników tlenu do budowy predykcyjnych algorytmów kontroli emisji spalin jest oryginalne i interesujące naukowo. Również propozycje Autora dotyczące kierunków rozwoju zaproponowanego rozwiązania należy uznać za wartościowe i ciekawe. Opiniowana rozprawa doktorska, mieszcząca się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna posiada oryginalne cechy nowości i walory użytkowe.

Wątpliwości i nieścisłości wykazane w poszczególnych rozdziałach pracy znacząco nie obniżają poziomu pracy ale wymagają dodatkowego wyjaśnienia. Kierując się „Ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” z dnia 14 marca 2003 roku oraz ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” wnioskuję o dopuszczenie Autora pracy do publicznej obrony.

Prof. dr hab. inż. Andrzej Popiński