

Zintegrowany system wspomagania decyzji do diagnostyki akustycznej w badaniu stanu technicznego silnika spalinowego

Integrated decision support system for acoustic diagnostics in the technical state of the internal combustion engine

ADAM DEPTUŁA
PIOTR OSIŃSKI*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.7.77>

Prezentowano przykład zastosowania systemu zintegrowanego jako narzędzia systemu wspomagania decyzji w diagnostyce akustycznej stanu technicznego silnika spalinowego. Obiektem badawczym był silnik spalinowy o zapłonie samoczynnym jednostki napędowej firmy Fiat, z systemem *common rail*. Materiały są wynikiem badań w obszarze projektowania i eksploatacji silników spalinowych, prowadzonych w Katedrze Inżynierii Pojazdów oraz Laboratorium Napędów Hydraulicznych i Wibroakustyki Maszyn przy Politechnice Wrocławskiej. Opracowano autorską metodę identyfikacji rodzaju uszkodzeń silnika z zastosowaniem grafów rozgrywających parametrycznie. Do testowania i identyfikacji własności akustycznych stworzono zintegrowany system decyzyjny, uwzględniający indukcyjny system uczenia maszynowego. **SŁOWA KLUCZOWE:** zintegrowany system wspomagania decyzji, diagnostyka akustyczna, silnik spalinowy, indukcyjne drzewa decyzyjne

Presented are possible applications of acoustic diagnostics in inspecting the technical condition of an internal combustion engine with autoignition on the example of the Fiat drive unit with common rail system. As a result of measuring the sound pressure level for specific faults and comparing the noise generated by the motor running smoothly, the detailed maps of changes in the acoustic spectrum are possible to generate. These results may be helpful in the future diagnostics of internal combustion engines. The results of scientific work in the area of research, design and operation of internal combustion engines, conducted at the Department of Automotive Engineering, in cooperation with the Laboratory of Hydraulic Drives & Vibroacoustics of Machines at the Wrocław University of Technology are included. It has developed an authoritative method of identifying the type of engine damage using game-tree structures. An integrated decision system for induction machine learning was developed to test and identify acoustic properties.

KEYWORDS: *game-tree structures, acoustic diagnostics, combustion engine, induction of decision trees*

Wymogi związane z bezpieczeństwem i ekonomią zmuszają użytkowników maszyn do minimalizowania nieplanowanych remontów i awarii. Jednym z elementów

racjonalnej eksploatacji maszyn jest ich regeneracja. Na podstawie obserwacji diagnostycznej można zaplanować termin i ewentualny zakres zabiegów regeneracyjnych, a także przygotować materiały i podzespoły do wymiany. Jednym z głównych problemów konstruktorów silników spalinowych jest zaprojektowanie rzetelnego systemu OBD (*on-board diagnostics*) – samodiagnostyki samochodów. Tego typu systemy są również powodem zwiększenia gabarytów oraz kosztów produkcyjnych i eksploatacyjnych silników spalinowych. Obowiązkową funkcją tych systemów jest pomiar i monitorowanie podstawowych parametrów układu napędowego, w tym wszystkich parametrów emisyjnych. Ważną rzeczą jest opracowanie systemu pomiaru widma fal akustycznych eliminującego wpływ zakłóceń pochodzących od szumu tła oraz innych elementów niemających wpływu na pracę silnika [1].

Badanie parametrów pracy silników jest ważne zarówno w procesie produkcyjnym, jak i podczas ich eksploatacji. Dzięki pomiarom możliwa jest diagnoza związana z nieprawidłową pracą silnika lub innymi parametrami odbiegającymi od pożądanych, jak np. zużycie paliwa [2, 3]. W pracach [4, 5] skoncentrowano się na badaniu rzetelności akustycznej metody diagnostyki silnika spalinowego Fiat 1.3 JTD o mocy 70 KM. Pomiary polegały na porównaniu poziomu ciśnienia akustycznego konkretnych częstotliwości pracy silnika z indukowanymi usterekami z pracą silnika sprawnego. Dodatkowo w publikacji [5] stworzono system decyzyjny bazujący na grafach i strukturach rozgrywających parametrycznie, który pozwala identyfikować uszkodzenie na podstawie charakterystyki widmowej emisji dźwięku. Rozbudowa narzędzia decyzyjnego poprzez stworzenie hybrydowego systemu zintegrowanego pozwoli w przyszłości na stworzenie metody diagnostycznej nieinwazyjnej kontroli stanu technicznego silnika.

Badanie silnika spalinowego

Pomiary zostały przedstawione w pracach [4, 5]. Dotyczą silnika o zapłonie samoczynnym z układem *common rail* – Fiat 1.3 JTD seria 188A9000. Przeprowadzono łącznie 13 badań widma fali akustycznej dla różnych przypadków zadawanych usterek badanego silnika. Do wyznaczenia poziomu dźwięku średniego L_{eqA} (w dB), maksymalnego L_{Amax} (w dB) i minimalnego L_{Amin} (w dB) wykorzystano modułarny miernik poziomu ciśnienia akustycznego z zapisem historii czasowej i analizą częstotliwości (sonometr, klasa dokładności I) firmy B&K typ 2250

* Dr inż. Adam Deptuła (a.deptula@po.edu.pl) – Instytut Innowacyjności Procesów i Produktów, Wydział Inżynierii Produkcji i Logistyki Politechniki Opolskiej; dr hab. inż. Piotr Osiński (piotr.osinski@pwr.edu.pl) – Katedra Eksploatacji Systemów Logistycznych, Systemów Transportowych i Układów Hydraulicznych, Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej

nr serii 2506429 z przedwzmacniaczem typu ZC 0032 nr fabryczny 4112 i mikrofonem typu 4189 nr serii 2519832. Przed rozpoczęciem i po dokonaniu pomiarów poddano kalibracji cały tor pomiarowy. Użyto wzorcowego źródła ciśnienia akustycznego o ściśle określonym poziomie $L_p = 93,98$ dB. Spełnienie wymogów potwierdza aktualne świadectwo wzorcowania Okręgowego Urzędu Miar we Wrocławiu nr W5/401-156/1/12 z 17 lipca 2012 r. Stanowisko pomiarowe składało się z hamulca wiroprądowego zawierającego układ chłodzenia, uzwojenie prądu i tarczę biegunową osadzoną na wale, który jest połączony z wałem korbowym silnika. Miernik poziomu dźwięku został umieszczony w odległości $d = 1$ m od prostopadłościanu, otaczającego korpus silnika, wyznaczonego zgodnie z przyjętą normą [4, 5].

Wyniki pomiarów

Pierwszym badaniem był pomiar hałasu tła na stanowisku pomiarowym. Hałas jest wywoływany głównie przez przepływ cieczy chłodzącej w układzie hamulca wiroprądowego. Kolejne 12 pomiarów przeprowadzono dla sześciu różnych przypadków stanu diagnostycznego silnika przy obciążeniu 80 Nm, dla dwóch prędkości obrotowych silnika – 1000 obr/min oraz 2000 obr/min. Czas każdego pomiaru wynosił $t = 10$ s. Obejmowały one następujące przypadki [4, 5]:

- silnik w idealnym stanie diagnostycznym w stanie nierozgrzanym,
- silnik w idealnym stanie diagnostycznym po osiągnięciu właściwej temperatury pracy,
- odłączony czujnik układu recyrkulacji spalin EGR,
- odłączony czujnik doładowania ciśnienia,
- odłączony czujnik położenia wałka rozrządu,
- odłączony wtryskiwacz nr 2.

Wyniki uzyskano w formie wartości ciśnienia akustycznego naniesionego na wykresy dla poszczególnych częstotliwości [4, 5]. Różnice poziomu ciśnienia akustycznego względem poziomu odniesienia liczono według wzoru:

$$\Delta L = 10 \log \left(\left| 10^{0,1L_n - 0,1L_0} \right| \right) \quad (1)$$

gdzie: ΔL – zmiana wartości ciśnienia akustycznego w dB; L_0 – wartość ciśnienia akustycznego odniesienia (silnik bez usterek) w dB; L_n – wartość ciśnienia akustycznego dla n -tej próby w dB.

Zintegrowany system wspomagania decyzji

Zintegrowane systemy decyzyjne opierają się przede wszystkim na reprezentowaniu wiedzy ekspertów za pomocą: reguł *if, then – jeżeli, to wtedy*; tzw. ramek (*frames*) do opisu obiektów; reguł logiki rozmytej (*fuzzy logic rules*); sieci semantycznych oraz opisu przypadków (*cases*). Systemy te wykorzystują w znacznej mierze metody sztucznej inteligencji. Dużą rolę odgrywa baza wiedzy, która jest rozszerzeniem bazy danych i jest budowana dla każdego systemu oddzielnie. Bazy wiedzy systemu zapisywane są w języku opisu bazy wiedzy, integrującym deklaracyjny język reprezentacji wiedzy oraz imperatywny język programowania strukturalnego.

W pracach [4, 5] omówiono wykorzystanie systemu ekspertowego diagnostyki akustycznej do wspomagania procesu realizacji dziedzinowych. Często zbiór analizowanych danych (przykładów uczących) zapisywany jest w logice pierwszego rzędu. Funkcje odwzorowujące przykłady na odpowiedni zbiór pojęć mogą być poszukiwane

wieloma metodami (m.in. [7]). Jedną z metod klasyfikacji informacji i wspomagania decyzji jest indukcyjne generowanie reguł za pomocą drzew decyzyjnych [8, 9].

Klasyfikacja z zastosowaniem drzew indukcyjnych

W ramach generowania indukcyjnych drzew decyzyjnych przeprowadza się w określonej kolejności serie testów, a kryterium umożliwiającym wybór atrybutu do rozbudowy drzewa jest entropia. W klasyfikacji z wykorzystaniem drzew indukcyjnych zakłada się, że dana jest dziedzina X , na której są określone atrybuty a_1, a_2, \dots, a_n , klasa pojęć C o zbiorze kategorii C oraz:

- liść zawierający dowolną etykietę kategorii $d \in C$ jest drzewem decyzyjnym;
- $t: X \rightarrow R_t$ jest testem przeprowadzanym na wartościach atrybutów przykładów o zbiorze możliwych wyników $R_t = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$.

Każdemu ze skończonej liczby możliwych wyników testu odpowiada gałąź prowadząca z węzła do poddrzewa. Jeśli węzeł zawiera test t o zbiorze wyników $R_t = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$, a odpowiadające im gałęzie prowadzą do poddrzew T_1, T_2, \dots, T_m , to hipotezę reprezentowaną przez ten węzeł można dla każdego przykładu $x \in X$ zapisać następująco:

$$h(x) = \begin{cases} h_1(x) & \text{jeśli } t(x) = r_1 \\ h_2(x) & \text{jeśli } t(x) = r_2 \\ \dots & \\ h_m(x) & \text{jeśli } t(x) = r_m \end{cases} \quad (2)$$

przy czym: h_1, h_2, \dots, h_m są odpowiednio hipotezami reprezentowanymi przez drzewa T_1, T_2, \dots, T_m .

Oczekiwana wartość informacji po podziale zbioru przykładów E na podzbiory $E^{(m)}$, $m = 1, \dots, |V_a|$, dla których atrybut a ma wartość V_m , określona jest jako [8, 9]:

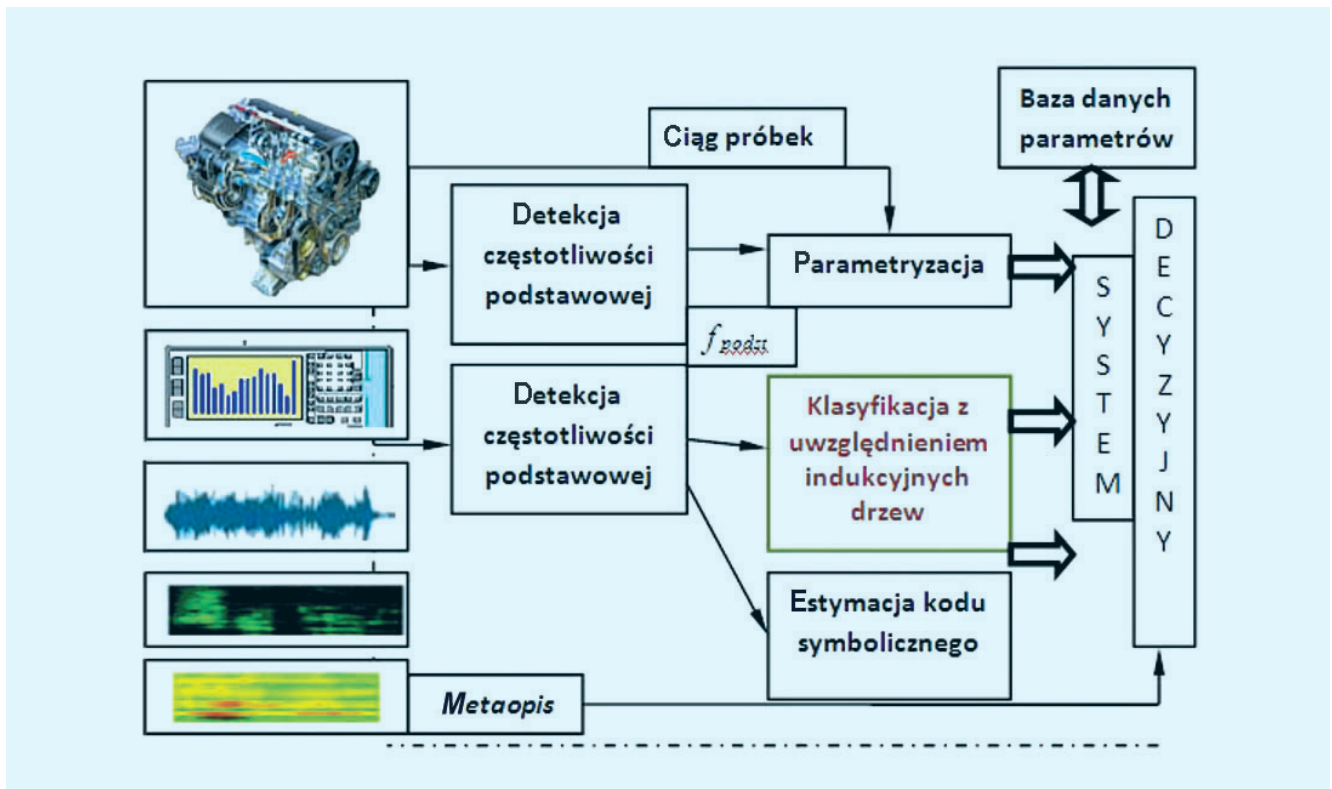
$$I(E, a) = \sum_{m=1, K, |V_a|, E^{(m)} \neq \emptyset} \frac{|E^{(m)}|}{|E|} \cdot I(E^{(m)}) \quad (3)$$

gdzie: $|E^{(m)}|$ – liczba przykładów po podziale zbioru E względem wartości m danego atrybutu; $|E|$ – liczba przykładów w zbiorze uczącym E .

Zastosowanie indukcyjnych drzew decyzyjnych w diagnostyce stanu technicznego

Dla zbioru przykładów należy zbudować zbiór przykładów uczących i testujących. Wymaga to zbudowania atrybutów wejściowych *we* oraz wyjściowych *wy*. Na potrzeby tworzenia pliku uczącego przyjęto parametry decyzyjne: X_1 – odłączony czujnik ciśnienia doładowania, X_2 – odłączony czujnik położenia wałka, X_3 – odłączony wtryskiwacz nr 2, X_4 – odłączony czujnik paliwa – dla L_{eqA} w dB dla 1000 i 2000 obr/min oraz atrybuty:

- wejściowe (*we*) wartości częstotliwości: $f = \{6,3 \text{ Hz (we), } 8 \text{ Hz (we), } 10 \text{ Hz (we), } 12,5 \text{ Hz (we), } \dots, 20 \text{ kHz (we), } A \text{ (we), } Z \text{ (we)}\}$;
- wyjściowe (*wy*) przyjęte usterki dla L_{mA} w dB dla 1000 obr/min: $X_n^{(1000)} = \{X_1^{(1000)} \text{ (wy), } X_2^{(1000)} \text{ (wy), } X_3^{(1000)} \text{ (wy), } X_4^{(1000)} \text{ (wy)}\}$
- wyjściowe (*wy*) przyjęte usterki dla L_{mA} w dB dla 2000 obr/min: $X_n^{(2000)} = \{X_1^{(2000)} \text{ (wy), } X_2^{(2000)} \text{ (wy), } X_3^{(2000)} \text{ (wy), } X_4^{(2000)} \text{ (wy)}\}$.



Rys. Przykładowe zapytanie do systemu decyzyjnego *query by example*

Kolejne wiersze bazy wiedzy zawierają wyniki L_{eqA} w dB jako przykłady. W pliku uczącym *.lrm zapisywane są przykłady uczące, natomiast w pliku testowym *.tst zapisywane są przykłady testowe służące do testowania poprawności klasyfikacji. Uwzględniając dodatkowe narzędzie grafowe z prac [4, 5], można uzyskać bardziej rozbudowany zintegrowany system decyzyjny. Proces klasyfikacji danych akustycznych można przedstawić na podstawie ogólnego schematu (rysunek).

Wnioski

W wyniku pomiaru poziomu ciśnienia akustycznego odcytanego dla konkretnych usterek i porównania z hałasem generowanym przez sprawnie działający silnik możliwe jest wygenerowanie dokładnych map zmian widma akustycznego. W tej metodzie diagnostyki należy zwrócić uwagę na charakterystyczne zmiany widma akustycznego dla konkretnych usterek:

- **odłączonego czujnika ciśnienia doładowania** – główne zmiany dotyczą częstotliwości 315 Hz oraz 2,5 kHz, ponieważ tam dochodzi do wyraźnych spadków poziomu ciśnienia akustycznego zarówno przy prędkości obrotowej 1000 obr/min, jak i 2000 obr/min. Różnice te wynoszą ok. -1,5 dB dla 315 Hz przy obu prędkościach obrotowych oraz -1,01 dB przy 1000 obr/min i -0,66 dB przy 2000 obr/min dla fali o częstotliwości 2,5 kHz;
- **odłączonego czujnika położenia wałka rozrządu** – najlepszy obraz zmiany widma powstaje podczas badania przy prędkości obrotowej 1000 obr/min. Przy wyższej prędkości obrotowej nie odnotowano znaczących różnic;
- **odłączonego wtryskiwacza nr 2** – jedyny typ usterek, który można stwierdzić za pomocą nieuzbrojonego ucha; silny wzrost poziomu hałasu nisko- i średniczęstotliwościowego;
- **odłączonego czujnika ciśnienia paliwa** – sytuacja podobna jak przy odłączonym czujniku położenia wałka

rozrządu, z tym że zarówno wzmocnienia, jak i wytłumienia fal są mniejsze.

W pracach [4,5] graf zależności rozgrywający parametrycznie z uwzględnieniem algorytmu przeszukiwania znajdował cechy, charakterystyczne punkty lub wartości (indywidualne dla każdego uszkodzenia), za pomocą których można było wstępnie scharakteryzować, do jakiego uszkodzenia należy analizowany rozkład ciśnienia akustycznego. Indukcyjne drzewa decyzyjne pozwalają zbudować drabinę pomiarową, która umożliwi określenie rodzaju uszkodzenia silnika na podstawie pomiarów ciśnienia akustycznego na wybranych częstotliwościach.

LITERATURA

1. Zhen D., Wang T., Gu F., Tesfa B., Ball A. "Acoustic measurements for the combustion diagnosis of diesel engine fuelled with biodiesels". *Meas. Sci. Technol.* 24 (2013): 055005.
2. Osiński P., Kollek W. "Assessment of energetic measuring techniques and their application to diagnosis of acoustic condition of hydraulic machinery and equipment". *Archives of Civil and Mechanical Engineering.* 13, 3 (2013): s. 313–321.
3. Adailah W.M. "Engine fault diagnosis using acoustic signals". *Applied Mechanics and Materials.* 295–298 (2013): s. 2013–2020.
4. Deptuła A., Kunderman D., Osiński P., Radziwanowska U., Włostowski R. "Acoustic diagnostics applications in the study of technical condition of combustion engine". *Archives of Acoustics.* 41, 2 (2016): s. 345–350.
5. Deptuła A., Osiński P., Radziwanowska R. "Decision support system for identifying technical condition of combustion engine". *Archives of Acoustics.* 41, 3 (2016): s. 449–460.
6. Pieczyński A. „*Reprezentacja wiedzy w diagnostycznym systemie ekspertowym*”. Zielona Góra: Lubuskie Towarzystwo Naukowe w Zielonej Górze, 2003.
7. Merthold M., Hand D. „*Intelligent data analysis. An introduction*”. Berlin: Springer Verlag, 1999.
8. Quinlan J.R. "Induction of decision trees". *Machine Learning.* 1 (1986): s. 81–10.
9. Deptuła A. „Indukcyjne drzewa decyzyjne (entropia) jako odpowiednik zmodyfikowanych drzew logicznych w wyznaczaniu rangi ważności zmiennych decyzyjnych projektowanego układu”. *XLIII Konf. Zast. Mat. Zakopane 2014*. Warszawa: Inst. Mat. PAN.