

Włodzimierz KUPICZ*
Stanisław NIZIŃSKI

METODA DIAGNOZOWANIA SILNIKÓW SPALINOWYCH W WARUNKACH TRAKCYJNYCH

W pracy przedstawiono nową metodę diagnozowania silnika spalinowego o ZS w warunkach trakcyjnych. Istota polega na wyznaczeniu momentu obrotowego silnika na podstawie rejestracji przyspieszenia w warunkach drogowych. Omówiono wyniki obszernych wstępnych i zasadniczych badań eksperymentalnych. Opracowano trzy warianty modelu diagnostycznego silnika spalinowego, z wykorzystaniem trójwartościowej oceny stanów. Zaproponowano algorytmy kontroli stanu i lokalizacji uszkodzeń silnika. Zweryfikowano nową metodę w warunkach trakcyjnych. Prawdopodobieństwo poprawnej diagnozy silnika spalinowego wynosi $0,85 \div 1$.

***Słowa kluczowe:** silniki spalinowe, diagnozowanie silników spalinowych, metody diagnostyczne*

WPROWADZENIE

Na podstawie analizy i oceny metod diagnostycznych silników spalinowych o zapłonie samoczynnym należy stwierdzić, że [3, 5, 7]:

- znaczna liczba używanych metod diagnostycznych silników spalinowych o ZS charakteryzuje się złożonymi algorytmami diagnozowania i dużą pracochłonnością, co powoduje, że są one mało przydatne w diagnostyce tych obiektów technicznych;
- duża liczba istniejących metod diagnostycznych silników spalinowych nie ma ustalonych wartości granicznych parametrów diagnostycznych;
- nie ma dotychczas obiektywnych metod diagnostycznych ilościowego ustalenia stopnia zużycia układu tłokowo-korbowego i rozrządu silników spalinowych;

* dr inż. Włodzimierz KUPICZ, prof. dr hab. inż. Stanisław NIZIŃSKI - Wojskowy Instytut Techniki Pancernej i Samochodowej

- zachodzi konieczność opracowania metod genezowania i prognozowania stanu, w aspekcie możliwości ich wykorzystania w praktycznej realizacji procesu obsługi silników spalinowych;
- znaczna liczba istniejących metod to stanowiskowe metody statyczne i quasi-dynamiczne, które nie nadają się do zastosowania w pokładowych systemach diagnostycznych;
- naszym zdaniem nie istnieje obecnie wystarczający zbiór metod i środków umożliwiających pełną i efektywną kontrolę stanu i lokalizacji uszkodzeń silnika o ZS w warunkach stacjonarnych, a w szczególności podczas jazdy;
- istnieje potrzeba opracowania efektywnej metody kontroli stanu i lokalizacji uszkodzeń silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym, do wykorzystania w pokładowych systemach diagnostycznych.

1. DIAGNOSTYCZNY MODEL ROZPĘDZANIA SAMOCHODU

1.1. Istota procesu rozpędzania samochodu

W procesie rozpędzania pojazdu na wybranym biegu, moment obrotowy silnika spalinowego z wału korbowego przekazywany jest do sprzęgła, skrzyni biegów i dalej poprzez skrzynię rozdzielczą, przekładnię główną – na koła samochodu. Siła napędowa F_n , jaka wytwarzana jest przez silnik, musi być większa niż sumaryczna siła oporów ruchu, na którą składają się: siły bezwładności F_b , oporu toczenia F_t oraz oporu powietrza F_p na drodze poziomej.

Wraz ze wzrostem prędkości jazdy rośnie sumaryczna siła oporów ruchu i przyspieszenie pojazdu maleje, aż do ustalenia się prędkości, przy której siła napędowa zostaje zrównoważona przez siłę oporów ruchu, bądź też osiągnięta zostanie maksymalna prędkość obrotowa silnika.

1.2. Równania ruchu pojazdu podczas rozpędzania samochodu

Ogólne równanie ruchu prostoliniowego pojazdu po drodze płaskiej ma postać [1, 2]:

$$F_n = F_t + F_p + F_b \quad (1)$$

gdzie:

F_n – siła napędowa na kołach pojazdu;

F_t – siła oporów toczenia;

F_p – siła oporów powietrza;

F_b – siła oporów bezwładności.

1.3. Istota nowej metody

Proponowana metoda bazuje na wyznaczeniu momentu obrotowego silnika na podstawie rejestracji przyspieszenia w czasie ruchu pojazdu w warunkach drogowych. Jednoczesny pomiar zużycia paliwa pozwala na wyznaczenie godzinowego zużycia paliwa w funkcji prędkości obrotowej silnika.

1.4. Metodyka wyznaczania zbioru parametrów diagnostycznych

Wyznaczenie zbioru parametrów diagnostycznych silników spalinowych w warunkach trakcyjnych odbywa się w sposób następujący:

- Pomiar prędkości liniowej pojazdu i prędkości obrotowej silnika,
- Wyznaczenie promienia dynamicznego koła r_d z zależności:

$$r_d = \frac{v^* i_c}{n_s} \quad (2)$$

gdzie:

- v – prędkość liniowa pojazdu;
- i_c – przełożenie całkowite układu napędowego;
- n_s – prędkość obrotowa silnika.

- Próba swobodnego wybiegu pojazdu. Wielkością mierzoną jest opóźnienie a_f i a_c ruchu pojazdu. Opory toczenia wyznaczane są przy prędkościach poniżej 10 km/h. Do wyznaczenia oporów powietrza służy opóźnienie a_c zarejestrowane przy prędkościach 75–20 km/h.
- Wyznaczenie współczynnika oporów toczenia pojazdu ze wzoru:

$$f = \frac{a_f}{g} \left(1 + \frac{\sum I_k}{mr_d^2} \right) \quad (3)$$

gdzie:

- a_f – opóźnienie ruchu pojazdu;
- g – przyspieszenie ziemskie;
- I_k – moment bezwładności koła jezdnego;
- m – masa pojazdu.

Współczynnik oporów toczenia pojazdu obejmuje opory toczenia koła oraz opory: w łożyskach kół, w zazębieniu kół przekładni oraz przegubach wałów.

- Wyznaczenie współczynnika oporów powietrza pojazdu ze wzoru:

$$C_x = \left(-\frac{m}{\rho A v^2} \right) \left(fg + a_c + \frac{a_c \sum I_k}{mr_d^2} \right) \quad (4)$$

gdzie:

- A – powierzchnia czołowa pojazdu;
- a_c – opóźnienie ruchu pojazdu w zakresie wyższych prędkości jazdy;
- ρ – gęstość powietrza.

- Pomiar przyspieszenia pojazdu i zużycia paliwa. Rozpoczyna się po ustabilizowaniu minimalnej prędkości na biegu trzecim, a następnie poprzez gwałtowne naciśnięcie do oporu pedału przyspieszenia rozpędza się samochód aż do osiągnięcia maksymalnej prędkości. Mierzone jest przemieszczenie pojazdu, prędkość obrotowa wału korbowego silnika i zużycie paliwa.
- Wyznaczenie momentu obrotowego z zależności:

$$M_s = \left(\frac{mgfr_d + \rho C_x A v^2 r_d + \delta m r_d a_p}{i_c \eta_m} \right) \quad (5)$$

gdzie:

- δ – współczynnik mas wirujących;
- a_p – przyspieszenie ruchu pojazdu;
- G_e – chwilowe godzinowe zużycie paliwa pomierzone w procesie rozpędzania.

2. BADANIA EKSPERYMENTALNE

2.1. Program badań

Badania eksperymentalne wykonano wg następującego programu:

- badania powtarzalności wyników badań;
- ustalenie wartości parametrów diagnostycznych silnika zdatnego;
- ocena wpływu warunków atmosferycznych;
- ocena wpływu warunków ruchu na wartości parametrów diagnostycznych;
- ocena wpływu wybranych uszkodzeń na wartości parametrów diagnostycznych;
- badania laboratoryjne pozwalające zweryfikować nową metodę.

2.2. Wybór zbioru proponowanych parametrów diagnostycznych

Wybraną charakterystyką, która ma odzwierciedlać zmiany stanów silnika 4CTi90–1 BE6, jest charakterystyka zewnętrzna momentu obrotowego w funkcji prędkości obrotowej oraz charakterystyka zewnętrzna zużycia paliwa. Proponowanymi parametrami diagnostycznymi wyznaczonymi z charakterystyk silnika są:

- wartość średnia momentu obrotowego \bar{M}_s ;
- wartość maksymalnego momentu obrotowego M_{smax} przy prędkości obr. n_M ;
- prędkość obrotowa maksymalnego momentu obrotowego n_M ;
- wartość momentu obrotowego M_{s0} przy minimalnej prędkości obr. $n_0=n_{min}$;
- wartość momentu obrotowego M_{si} przy maksymalnej prędkości Obr. $n_i=n_{max}$;
- stosunek momentu obrotowego przy n_{min} do momentu maksymalnego:

$$C_{M1} = \frac{M_{s0}}{M_{smax}} * 100\% \quad (6)$$

- stosunek momentu obrotowego przy n_{max} do momentu maksymalnego:

$$C_{M2} = \frac{M_{si}}{M_{smax}} * 100\% \quad (7)$$

Do zbioru parametrów diagnostycznych włączono także parametry ustalone na podstawie charakterystyki godzinowego zużycia paliwa $G_e = f(n)$:

- średnie zużycie paliwa \bar{G}_e ;
- zużycie paliwa G_{eM} przy prędkości maks. momentu obrotowego n_M ;
- zużycie przy minimalnej prędkości obrotowej G_{emin} ;

- zużycie paliwa przy maksymalnej prędkości obrotowej Ge_{max} ;
- stosunek zużycia paliwa przy maks. momencie do zużycia minimalnego:

$$C_{Ge1} = \frac{Ge_M}{Ge_{min}} * 100\% \quad (8)$$

- stosunek maks. zużycia paliwa do zużycia przy maks. momencie obrotowym:

$$C_{Ge2} = \frac{Ge_{max}}{Ge_M} * 100\% \quad (9)$$

2.3. Stanowisko i aparatura pomiarowa

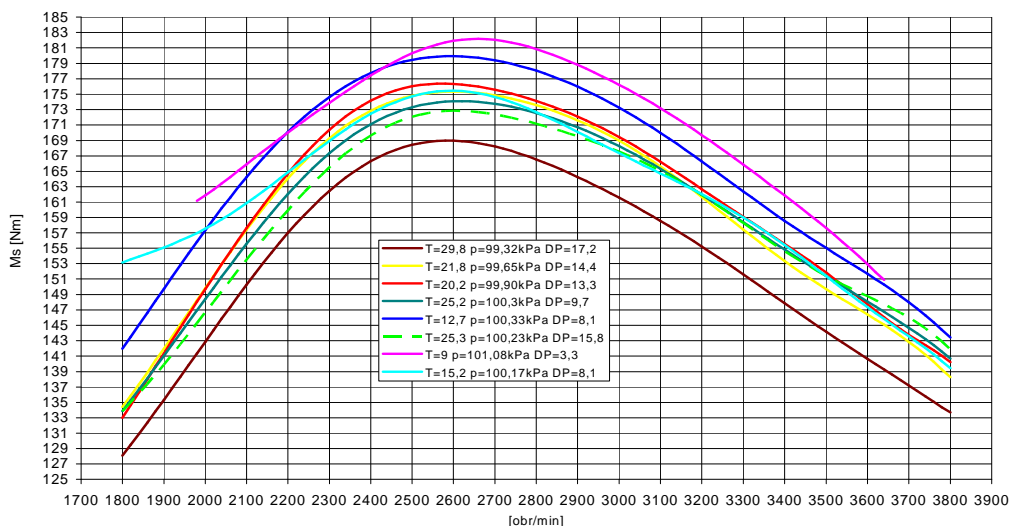
Stanowisko badań diagnostycznych silnika 4CTi90–1 BE6 stanowił samochód marki HONKER. Poszczególne sygnały rejestrowano przy użyciu następującej aparatury:

- optoelektroniczny czujnik prędkości liniowej pojazdu DLS-1 firmy Corrsys-Datron;
- czujnik prędkości obrotowej silnika FS2–60 firmy Keyence;
- przepływomierz paliwa typ 116H firmy Pierburg;
- czujnik temperatury paliwa;
- stacja akwizycji i obróbki danych μ EEP–10 firmy Corrsys-Datron.

3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

3.1. Wpływ warunków atmosferycznych na wartości mierzonej wielkości

Analiza wyników wykazała istotne różnice w wartościach mierzonej wielkości w różnych warunkach atmosferycznych. W celu zmniejszenia niepewności postawionej diagnozy, przeprowadzono analizę wpływu warunków atmosferycznych oraz przedstawiono równania korekcyjne pozwalające odnieść uzyskane wyniki do normalnych warunków otoczenia, tj. temp. 20° C, ciśnienie 100 kPa.



Rys. 1. Wpływ warunków otoczenia na charakterystyki momentu obrotowego silnika spalinowego 4CTi90–1 BE6

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie analizy regresji wielokrotnej wyznaczono równania korekcyjne:

– dla momentu obrotowego:

$$M_{sk} = M_s - (0,5066 * (T_0 - T)) + 2,1704 * (p_0 - p) + 0,1435 * (DP_0 - DP) \quad (10)$$

gdzie:

M_{sk} – moment obrotowy skorygowany do warunków normalnych;

M_s – zmierzony moment obrotowy w temperaturze otoczenia T , ciśnieniu p i wilgotności DP ;

p_0 – ciśnienie odniesienia (normalne) wynoszące 100 kPa;

p – ciśnienie atmosferyczne podczas wykonywania pomiarów;

T_0 – temperatura odniesienia: 20° C;

T – temperatura otoczenia podczas wykonywania pomiarów;

DP – temperatura punktu rosy (charakteryzująca wilgotność powietrza);

DP_0 – temperatura punktu rosy – odniesienia, 10° C;

– dla zużycia paliwa:

$$Ge_k = Ge + (0,0394 * (T_0 - T)) - 0,8545 * (p_0 - p) - 0,3013 * (DP_0 - DP) \quad (11)$$

gdzie:

Ge_k – zużycie paliwa skorygowane do warunków normalnych;

Ge – zmierzone zużycie paliwa w temperaturze otoczenia T , ciśnieniu p i wilgotności DP ;

Procent wyjaśnionej zmienności dla wpływu czynników atmosferycznych na wartość momentu obrotowego wynosi ponad 90%, zaś dla zużycia paliwa 76,43%.

3.2. Wpływ warunków ruchu na wartość mierzonych wielkości fizycznych

Do oceny wpływu poszczególnych czynników przyjęto następujący tok postępowania. Obliczono przedziały ufności dla parametrów.

Na potrzeby niniejszej pracy zastosowano test rozróżnialności stanów, porównujący wartości średnie parametrów i przedziały ufności dla stanu zdatności i niezdatności. Określono identyfikowalność uszkodzenia za pomocą trójwartościowej oceny parametru. Dla braku rozróżnialności przyjęto wartość „0”. Jeśli wartość badanego parametru maleje na skutek uszkodzenia wynikiem sprawdzenia jest „-1”, jeśli rośnie „1”. Procedurę postępowania przedstawia model:

– określenie czy zmiana parametru jest identyfikowalna po uwzględnieniu przedziału ufności:

$$\left| \overline{y_0} - \overline{y_n} \right| > t_{\alpha 0} \frac{s_{y_0}^2}{\sqrt{n_0}} + t_{\alpha n} \frac{s_{y_n}^2}{\sqrt{n_n}} \quad (12)$$

gdzie:

$\overline{y_0}$ – wartość średnia parametru odpowiadająca stanowi zdatności;

$\overline{y_n}$ – wartość średnia parametru odpowiadająca stanowi n-tej niezdatności;

$t_{\alpha 0} \frac{s_{y_0}^2}{\sqrt{n_0}}$ – połowa przedziału ufności parametru odpowiadającego stanowi zdatności;

$t_{cn} \frac{s_{yn}^2}{\sqrt{n_n}}$ – połowa przedziału ufności parametru odpowiadającego stanowi n-tej niezdatności.

Jeżeli wynikiem sprawdzenia jest liczba różna od „0”, ustalenie czy wartość badanego parametru uległa zmniejszeniu czy też zwiększeniu na skutek uszkodzenia.

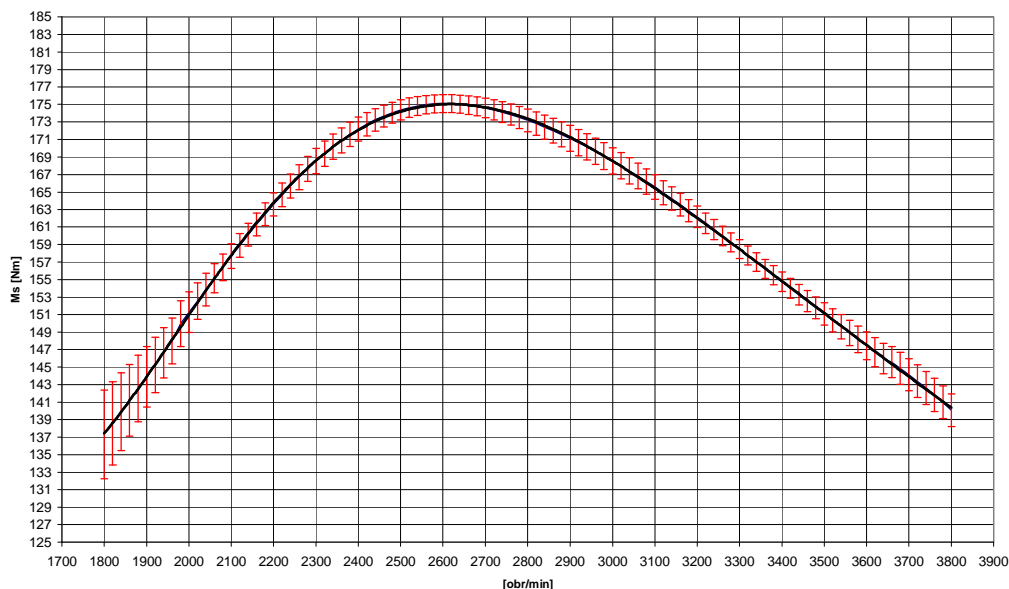
Wyniki badania wpływu warunków ruchu pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- wpływ oporów toczenia na wartości mierzonych wielkości jest nieistotny;
- kierunek jazdy nie ma istotnego wpływu na wartości mierzonych wielkości;
- rodzaj nawierzchni nie ma istotnego wpływu na wartości mierzonych wielkości;
- powierzchnia czołowa pojazdu nie ma wpływu na wartości mierzonych wielkości.

3.3. Określenie charakterystyki zdanego silnika

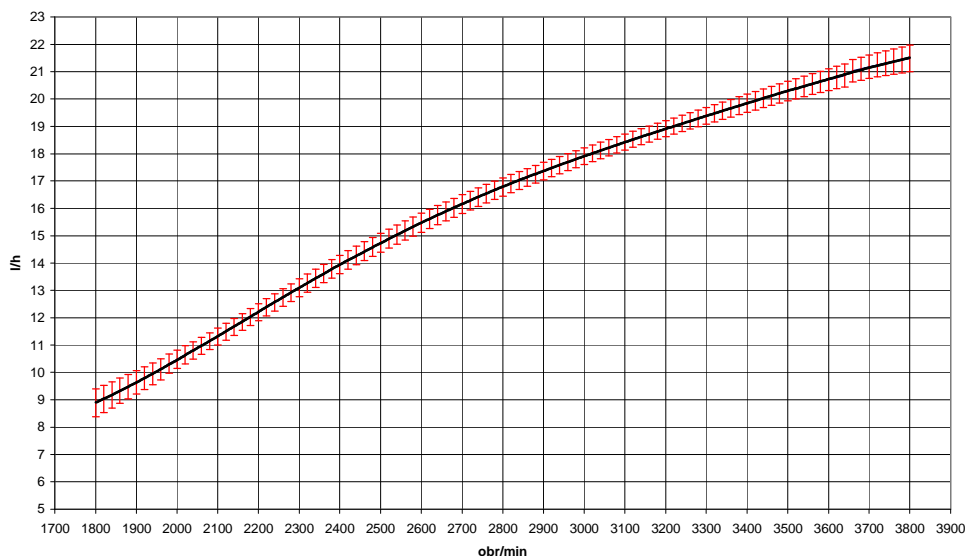
Charakterystyki zdanego silnika 4CTi90–1 BE6 wyznaczono na podstawie 8 sesji pomiarowych wykonywanych w różnych warunkach atmosferycznych. Podczas każdej sesji wykonywano po 30 pomiarów. Charakterystyki zdanego silnika przedstawiono na rysunkach 2 ÷ 3. Na wykresach przedstawiono również przedziały ufności parametrów diagnostycznych.

W tabeli 1 przedstawiono wartości parametrów diagnostycznych zdanego silnika, skorygowane do warunków normalnych otoczenia, oraz ich przedziały ufności.



Rys. 2. Charakterystyka momentu obrotowego zdanego silnika 4CTi90–1 BE6

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 3. Charakterystyka zużycia paliwa zdatnego silnika 4CTi90–1 BE6

Źródło: Opracowanie własne

Tabela 1. Parametry diagnostyczne zdatnego silnika spalinowego 4CTi90–1 BE6

Oznaczenie	Wartość parametru diagnostycznego	Połowa przedziału ufności
\bar{M}_s	160,64	$\pm 2,28$
M_{smax}	175,11	$\pm 1,02$
M_{s0}	137,31	$\pm 5,07$
M_{si}	140,07	$\pm 1,84$
n_M	2600	± 21
C_{M1}	0,7842	$\pm 0,0415$
C_{M2}	0,7999	$\pm 0,0112$
\bar{G}_e	16,14	$\pm 0,74$
G_{eM}	15,48	$\pm 0,35$
G_{emin}	8,89	$\pm 0,51$
G_{emax}	21,49	$\pm 0,48$
C_{Ge1}	0,5744	$\pm 0,0343$
C_{Ge2}	0,7204	$\pm 0,0306$

Źródło: Opracowanie własne

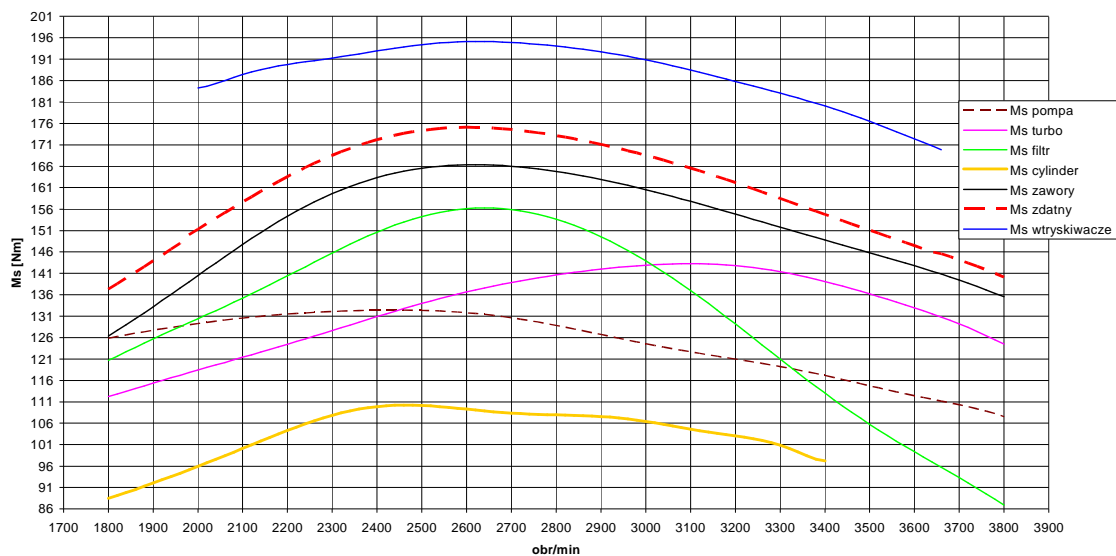
3.4. Wpływ uszkodzeń na wartości mierzonych wielkości fizycznych

Jako kryterium wyboru uszkodzeń do diagnozowania przyjęto słabe ogniwa badanego silnika, które ustalono na podstawie obserwowanej eksploatacji pojazdów w jednostkach wojskowych. Są to:

- pompa wtryskowa;
- turbosprężarka;
- filtr powietrza;
- wtryskiwacze;
- cylinder;

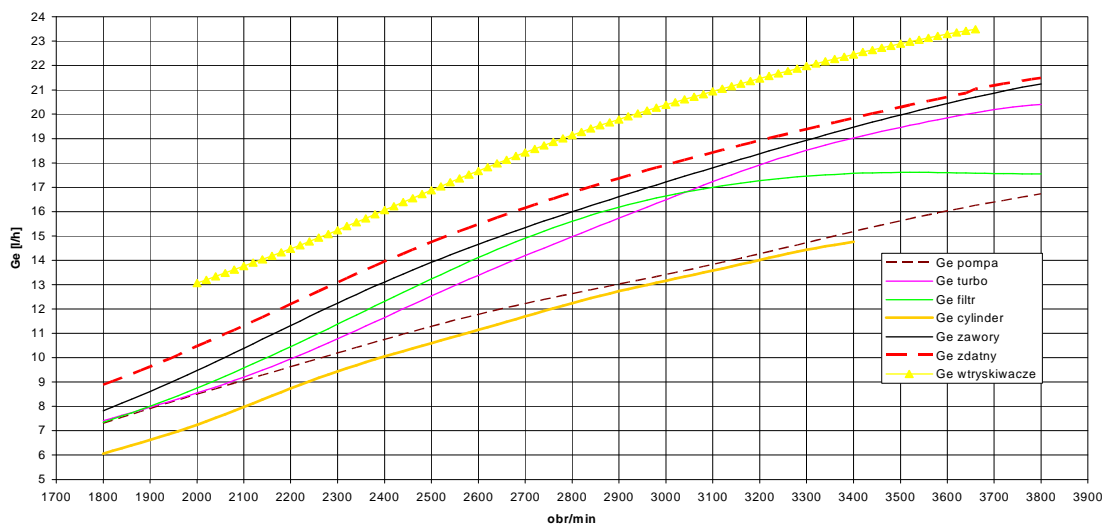
- układ rozrządu;
- inne.

Wyniki badań wpływu poszczególnych uszkodzeń na wartości proponowanych parametrów diagnostycznych, skorygowanych do warunków normalnych, przedstawiono w zestawieniu z parametrami silnika zdatego. Dla poszczególnych uszkodzeń obliczono przedziały ufności proponowanych parametrów diagnostycznych oraz przeprowadzono test rozróżnialności stanów według zależności 12. Wyniki przestawiono na rysunkach 4 ÷ 5. W tabeli 2 przedstawiono wyniki testu rozróżnialności stanów dla poszczególnych uszkodzeń.



Rys. 4. Zestawienie charakterystyk momentu obrotowego dla silnika zdatego oraz dla poszczególnych uszkodzeń

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 5. Zestawienie charakterystyk zużycia paliwa dla silnika zdatego oraz dla poszczególnych uszkodzeń

Źródło: Opracowanie własne

Tabela 2. Model informacyjny (macierz diagnostyczna) silnika 4CTi90-1 BE6

y/w		w^1	w_1^0	w_2^0	w_3^0	w_4^0	w_5^0	w_6^0
	Ozn.	Korektor pompy	Turbo	Filtr powietrza	Wtryskiwacze	Cylinder	Nieszcz. komora spalania	Zdatny
y_1	$\overline{M_s}$	0	-1	-1	-1	1	-1	-1
y_2	M_s	0	-1	-1	-1	1	-1	-1
y_3	M_{s0}	0	-1	-1	-1	1	-1	-1
y_4	M_{si}	0	-1	-1	-1	1	-1	0
y_5	n_M	0	-1	1	0	0	-1	0
y_6	C_{M1}	0	1	0	0	1	0	0
y_7	C_{M2}	0	0	1	-1	1	0	0
y_8	\overline{Ge}	0	-1	0	0	1	-1	0
y_9	G_{eM}	0	-1	1	0	1	-1	0
y_{10}	G_{emin}	0	-1	-1	-1	1	-1	0
y_{11}	G_{emax}	0	-1	0	-1	1	-1	0
y_{12}	C_{Ge1}	0	1	-1	0	1	0	0
y_{13}	C_{Ge2}	0	0	1	1	0	0	0

Źródło: Opracowanie własne

Z analizy tabeli 2 wynika, że:

- wyniki testu rozróżnialności stanów dla poszczególnych uszkodzeń są różne dla poszczególnych uszkodzeń, co świadczy o prawidłowości w doborze parametrów;
- najbardziej informatywnymi parametrami są: $\overline{M_s}$, M_s , M_{s0} , dla których zmiana wartości parametru jest rozróżnialna w przypadku wszystkich badanych uszkodzeń;
- najmniej informatywnymi parametrami są: C_{Ge2} – brak rozróżnialności dla czterech uszkodzeń, C_{M1} - brak rozróżnialności dla czterech uszkodzeń;
- najłatwiej identyfikowalne są: uszkodzenie pompy wtryskowej – zmiana wszystkich parametrów, oprócz C_{M2} i C_{Ge2} , oraz uszkodzenie wtryskiwaczy – zmiana wszystkich parametrów, oprócz n_M i C_{Ge2} , przy czym dla tego uszkodzenia wartość wszystkich parametrów rośnie;
- najtrudniej identyfikowalne jest uszkodzenie polegające na rozszczelnieniu komory spalania. W tym przypadku zmianie ulegają jedynie trzy parametry: $\overline{M_s}$, M_s i M_{s0} ;
- tabela 2 jest modelem informacyjnym (macierzą diagnostyczną) umożliwiającym kontrolę stanu i lokalizację wybranych uszkodzeń silnika 4CTi90-1 BE6.

4. METODA DIAGNOZOWANIA SILNIKA SPALINOWEGO 4CTi90–1 BE6

4.1. Model diagnostyczny

Na podstawie analizy wyników badań eksperymentalnych opracowano trzy warianty modelu diagnostycznego silnika 4CTi90–1 BE6. W artykule przedstawiony zostanie wariant najbardziej rozbudowany. Wariant ten charakteryzuje największa dokładność – trafność stawianej diagnozy. Jego wadą jest wysoki koszt oraz pracochłonność wykonania pomiarów. Wymaga pomiaru zużycia paliwa, co wiąże się z zakupem drogiej aparatury oraz czasochłonnego montażu w samochodzie.

Otrzymane wyniki badań porównywane są z wartościami wielkości zdadnego wzorcowego silnika i ustalana następnie jest wartość parametru:

- „0” – brak zmian (wartość parametru odpowiada stanowi zdadności);
- „1”- wartość parametru uległa zwieszeniu w porównaniu z wartością odpowiadającą stanowi zdadności;
- „-1” - wartość parametru zmalała w porównaniu ze stanem zdadności.

Jeśli wszystkie parametry mają wartość „zero”, to obiekt jest zdadny. Jeżeli w zestawieniu wyników zanotuje się „1” lub „-1”, to zbiór wyników sprawdzeń parametrów jest porównywany z kombinacjami wyników charakterystycznych dla poszczególnych uszkodzeń. Na tej podstawie jest określany stan niezdadności i lokalizowane uszkodzenie. Następnie lokalizacja uszkodzenia jest weryfikowana za pomocą porównania bezwzględnych wartości uzyskanych parametrów z wartościami odpowiadającymi poszczególnym uszkodzeniom. Trafność (prawdopodobieństwo) diagnozy jest obliczana na podstawie ilości parametrów, które odzwierciedlają swoim charakterem zmiany („0”, „1” lub „-1”) oraz wartości bezwzględnej parametrów opisujących dane uszkodzenie. Algorytm kontroli stanu i lokalizacji uszkodzeń silnika ma następującą postać:

Kontrola stanu:

Jeżeli $(\overline{M_s} = 0)$ i $(M_s = 0)$ i $(M_{s0} = 0)$ i $(M_{si} = 0)$ i $(n_M = 0)$ i $(C_{M1} = 0)$ i $(C_{M2} = 0)$ i $(\overline{G_e} = 0)$ i $(G_{eM} = 0)$ i $(G_{emin} = 0)$ i $(G_{emax} = 0)$ i $(C_{Ge1} = 0)$ i $(C_{Ge2} = 0)$ **to stan** w_1^1 ;

Lokalizacja uszkodzenia:

Jeżeli $(\overline{M_s} = -1)$ i $(M_s = -1)$ i $(M_{s0} = -1)$ i $(M_{si} = -1)$ i $(n_M = -1)$ i $(C_{M1} = 1)$ i $(C_{M2} = 0)$ i $(\overline{G_e} = -1)$ i $(G_{eM} = -1)$ i $(G_{emin} = -1)$ i $(G_{emax} = -1)$ i $(C_{Ge1} = 1)$ i $(C_{Ge2} = 0)$ **to stan** w_1^0 ;

Test uzupełniający w celu podwyższenia pewności diagnozy:

Jeżeli $(\overline{M_s} = 126,59 \pm 1,48 \text{ Nm})$ i $(M_s = 134,44 \pm 1,59 \text{ Nm})$ i $(M_{s0} = 127,85 \pm 2,03 \text{ Nm})$ i $(M_{si} = 109,56 \pm 3,32 \text{ Nm})$ i $(n_M = 2440 \pm 109 \text{ obr/min})$ i $(C_{M1} = 0,9510 \pm 0,0159)$ i $(C_{M2} = 0,8150 \pm 0,0211)$ i $(\overline{G_e} = 12,39 \pm 0,54 \text{ l/h})$ i $(G_{eM} = 10,94 \pm 0,57 \text{ l/h})$ i $(G_{emin} = 7,28 \pm 0,50 \text{ l/h})$ i $(G_{emax} = 16,70 \pm 0,09 \text{ l/h})$ i $(C_{Ge1} = 0,6653 \pm 0,0440)$ i $(C_{Ge2} = 0,6552 \pm 0,0504)$ **to stan** w_1^0 ;

i analogiczne dla pozostałych stanów do w_6^0

Prawdopodobieństwo trafnej diagnozy oblicza się następująco:

$$p_d = \frac{n_1}{n} * 100\% \geq p_{dgr} \quad (13)$$

gdzie:

- n_1 – liczba parametrów diagnostycznych, których wartość jest zbieżna z wartością wyznaczoną dla danego uszkodzenia;
- n – całkowita liczba parametrów diagnostycznych;
- p_{dgr} – graniczne prawdopodobieństwo trafności diagnozy $p_{dgr} = 0,85$

4.2. Weryfikacja metody

Weryfikację proponowanej metody przeprowadzono za pomocą:

- badań zadymienia spalin silnika zdatnego oraz przy wybranych uszkodzeniach;
- badań trakcyjnych samochodu z silnikiem zdatnym i z wybranymi uszkodzeniami.

Kryterium oceny stanowi trafność postawionej diagnozy. Wyniki badań weryfikacyjnych pozwalają stwierdzić, że prawdopodobieństwo trafności diagnozy wynosi powyżej 85%.

4.3. Niepewność wyznaczenia parametrów diagnostycznych

Oszacowano całkowitą, rozszerzoną niepewność wyznaczenia parametrów diagnostycznych w proponowanej metodzie. Przykładowo niepewność wyznaczenia maksymalnego momentu obrotowego wynosi:

$$U = k * U_c = 2,5 \quad Nm \quad (14)$$

natomiast niepewność godzinowego zużycia paliwa:

$$U = k * U_c = 0,36 \quad \frac{l}{h} \quad (15)$$

PODSUMOWANIE

Podsumowując pracę, należy stwierdzić, co następuje:

- przeprowadzono analizę i ocenę istniejących metod diagnostycznych, stwierdzono konieczność opracowania nowej metody diagnostycznej pozwalającej wykonywać diagnozowanie silnika spalinowego podczas rzeczywistych warunków drogowych i mogącej znaleźć zastosowanie w pokładowych i zewnętrznych systemach diagnostycznych;
- przedstawiono założenia teoretyczne nowej metody diagnostycznej. Zbiór parametrów stanu tworzą: moment obrotowy silnika M_s i godzinowe zużycie paliwa G_e ;
- przeprowadzono badania eksperymentalne;
- oszacowano całkowitą niepewność pomiaru momentu obrotowego i zużycia paliwa metody;
- na podstawie wykonanych badań i analiz ich wyników opracowano model diagnostyczny oraz algorytmy diagnozowania silnika 4CTi90–1 BE6;
- zweryfikowano metodę. Na podstawie badań stwierdzono, że prawdopodobieństwo trafności diagnozy jest nie mniejsze niż 85%.

LITERATURA

- [1] Arczyński S., *Mechanika ruchu samochodu*, WNT, Warszawa 1994.
- [2] Dębicki M., *Teoria samochodu*, WNT, Warszawa 1969.
- [3] Hebda M., Niziński S., Pelc H., *Podstawy diagnostyki pojazdów mechanicznych*, WKŁ, Warszawa 1984.
- [4] Kupicz W., *Metoda diagnozowania silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym za pomocą momentu obrotowego wyznaczonego w warunkach trakcyjnych*, Rozprawa doktorska, UWM, Olsztyn 2009.
- [5] Niziński S. i inni, *Diagnostyka samochodów osobowych i ciężarowych*, Dom Wydawniczy Bellona, Warszawa 1999.
- [6] Niziński S., Michalski R., *Diagnostyka obiektów technicznych*, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Warszawa-Sulejówek-Olsztyn-Radom 2002.
- [7] Żółtowski B., *Podstawy diagnostyki maszyn*, Wydawnictwa Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy, Bydgoszcz 1996.

METHOD FOR DIAGNOSING INTERNAL COMBUSTION ENGINES UNDER TRACTION CONDITIONS

Summary

The paper presents a new method for diagnosing an internal combustion engine with compression ignition under traction conditions. The gist lies in determining the engine torque on the basis of acceleration recording in traffic conditions. The results of extensive preliminary and basic experimental studies have been discussed. Three options have been developed of the internal combustion engine diagnostic model, using the trivalent assessment of states. State control and engine damage localization algorithms have been proposed. The new method has been examined under traction conditions. The probability of the internal combustion engine correct diagnosis ranges between 0.85÷1.

Key words: *internal combustion engines, diagnosing internal combustion engines, diagnostic methods*

Artykuł recenzował: prof. dr hab. inż. Janusz MYSŁOWSKI