

dr inż. Włodzimierz KUPICZ
dr inż. Paweł OGRODNIK
Zakład Sprzętu Pożarniczego, SGSP
Zakład Mechaniki Stosowanej, SGSP

Moment obrotowy, godzinowe zużycie paliwa, oraz temperatura spalin jako parametry diagnostyczne silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym pracującego w warunkach stacjonarnych

W artykule przedstawiono propozycję metody diagnozowania silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym, pracującego w warunkach stacjonarnych. Parametrami diagnostycznymi są: moment obrotowy, godzinowe zużycie paliwa oraz temperatura spalin. Badania prowadzone były na hamowni silnikowej na silniku zdatnym oraz po wprowadzeniu wybranych uszkodzeń. Opracowano model diagnostyczny i algorytmy diagnozowania.

This article presents a proposal of the method for diagnosing an internal combustion self-ignition engine, operating in stationary conditions. Diagnostic parameters are: torque, hourly fuel consumption, and exhaust temperature. Tests were conducted on the engine test bed, using the operable engine and after having introduced some selected damages. A diagnostic model and algorithms for diagnosing purposes were developed.

Słowa kluczowe: metody diagnostyczne, diagnozowanie silników spalinowych.
Keywords: diagnostic methods, diagnosing internal combustion engines.

1. Wprowadzenie

Silniki spalinowe napędzające agregaty prądotwórcze i inny sprzęt pożarniczy pracują zazwyczaj przy stałych prędkościach obrotowych. Do ich diagnozowania mogą zostać użyte następujące parametry diagnostyczne [1, 3, 5, 6]:

- moment obrotowy;
- godzinowe zużycie paliwa;
- temperatura spalin.

W niniejszej publikacji przedstawiono wyniki badań na hamowni podwozowej, algorytmy i model diagnostyczny silnika 4CTi90–1 BE6 firmy Andoria. Silnik ten stosowany jest do napędu wojskowych samochodów Honker oraz agregatów prądotwórczych.

2. Diagnostyczny model sprzętu pożarniczego

Podstawą budowy metody diagnostycznej jest wybór parametrów diagnostycznych, ustalenie granicznych wartości parametrów dla stanu zdadnego oraz dla poszczególnych uszkodzeń, opracowanie algorytmów diagnozowania [2, 3, 4, 5].

Liczbę stanów silnika spalinowego ustalono, przyjmując następujące założenia:

- 1) dwuwartościowa ocena stanów. Zbiór stanów silnika określony jest przez wyrażenie:

$$W = \{w^1, w^0\}, \quad (1)$$

gdzie:

w^1 – klasa stanów zdadności;

w^0 – klasa stanów niezdadności.

- 2) szeregową strukturą niezawodnościową obiektu badań;
- 3) w silniku o p elementach występuje pojedyncze uszkodzenie, zatem mamy:
 - jeden stan zdadności w^1 ;
 - $w^0 = p$ – stanów niezdadności.
- 4) stan zdadności zdefiniowano następująco:

$$\bigwedge_{y_n \in Y_{nz}} (y_{n \max} < y_n < y_{n \min}) \Rightarrow w_i \in w^1, \quad (2)$$

gdzie:

y_n – wartości parametru diagnostycznego;

$y_{n \min}$ i $y_{n \max}$ – wartości graniczne parametru diagnostycznego;

Y_{nz} – zbiór niezależnych i zupełnych parametrów diagnostycznych.

5) stan niezdatności zdefiniowano następująco:

$$\bigvee_{\substack{y_n \in Y_{nz} \\ n=1, N}} (y_n > y_{n \max} \cup < y_n < y_{n \min}) \Rightarrow w_i \in w^0, \quad (3)$$

6) zbiór stanów W_s silnika spalinowego 4CTi90-1 BE6 opisuje wyrażenie:

$$W_s = \{w^1, w_1^0, w_2^0, w_3^0, w_4^0, w_5^0\}, \quad (4)$$

gdzie:

w^1 – obiekt zdalny;

w_1^0 – niezdatny filtr powietrza;

w_2^0 – niezdatny wtryskiwacz;

w_3^0 – niezdatna turbosprężarka;

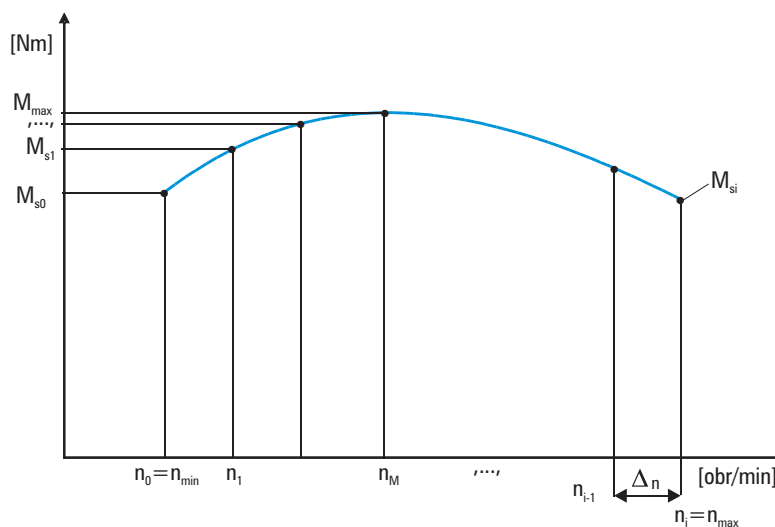
w_4^0 – niezdatna pompa wtryskowa;

w_5^0 – niewłaściwy luz zaworowy.

Jako kryterium wyboru uszkodzeń do diagnozowania przyjęto słabe ogniwa badanego silnika, na podstawie danych z obserwowanej eksploatacji w jednostkach Wojska Polskiego.

2.1. Wybór parametrów diagnostycznych

Wybraną charakterystyką, która ma odzwierciedlać zmiany stanów silnika 4CTi90-1 BE6 jest moment obrotowy w funkcji prędkości obrotowej, przedstawiony na rys. 1, oraz zużycie paliwa i temperatura spalin.



Rys. 1. Charakterystyka momentu obrotowego $M_s = f(n)$ jako podstawa badań silnika 4CTi90-1 BE6

Źródło: opracowanie własne

Parametrami diagnostycznymi mogą być:

- 1) wartość średnia momentu obrotowego \overline{M}_s ;
- 2) wartość maksymalnego momentu obrotowego M_{smax} przy prędkości obrotowej $n_{M'}$;
- 3) wartość momentu obrotowego M_{s0} przy minimalnej prędkości obrotowej $n_0 = n_{min}$;
- 4) wartość momentu obrotowego M_{si} przy maksymalnej prędkości obrotowej $n_i = n_{max}$;
- 5) stosunek momentu obrotowego przy minimalnej prędkości obrotowej do momentu maksymalnego:

$$C_{M1} = \frac{M_{s0}}{M_{max}} \cdot 100\% \quad (5)$$

- 6) stosunek momentu obrotowego przy maksymalnej prędkości obrotowej do momentu maksymalnego:

$$C_{M2} = \frac{M_{si}}{M_{smax}} \cdot 100\% \quad (6)$$

- 7) umiejscowienie maksymalnego momentu obrotowego na osi prędkości obrotowej – prędkość obrotowa maksymalnego momentu obrotowego n_M .

Do zbioru proponowanych parametrów diagnostycznych włączono także parametry ustalone na podstawie charakterystyki godzinowego zużycia paliwa $Ge = f(n)$ oraz jej charakterystycznych punktów:

- 8) średnie zużycie paliwa \overline{Ge} ;
- 9) zużycie paliwa Ge_M przy prędkości maks. momentu obrotowego $n_{M'}$;
- 10) zużycie przy minimalnej prędkości obrotowej Ge_{min} ;
- 11) zużycie paliwa przy maksymalnej prędkości obrotowej Ge_{max} ;
- 12) stosunek zużycia paliwa przy maksymalnym momencie do zużycia minimalnego:

$$C_{Ge1} = \frac{Ge_M}{Ge_{min}} \cdot 100\% \quad (7)$$

- 13) stosunek zużycia paliwa przy maksymalnej prędkości do zużycia przy maksymalnym momencie obrotowym:

$$C_{Ge2} = \frac{Ge_{max}}{Ge_M} \cdot 100\% \quad (8)$$

oraz na podstawie charakterystyki temperatury spalin:

- 14) średnia temperatura spalin T_{sr} ;
- 15) temperatura spalin przy prędkości maks. momentu obrotowego $T_{M'}$;
- 16) temperatura spalin przy minimalnej prędkości obrotowej T_{min} ;

- 17) temperatura spalin przy maksymalnej prędkości obrotowej T_{\max} ;
 18) stosunek temperatury spalin przy maksymalnym momencie do temperatury spalin przy minimalnej prędkości:

$$C_{T1} = \frac{T_M}{T_{\min}} \cdot 100\% \quad (9)$$

- 19) stosunek temperatury spalin przy prędkości maksymalnej do temperatury przy maksymalnym momencie obrotowym:

$$C_{T2} = \frac{T_{\max}}{T_M} \cdot 100\% \quad (10)$$

2.2. Algorytmy diagnozowania

Podstawą modelu diagnostycznego jest test rozróżnialności stanu. Uszkodzenia identyfikowane są za pomocą trójwartościowej oceny parametru. Otrzymane wyniki badań porównywane są z wartościami parametrów zdarnego – wzorcowego silnika i ustalana następnie jest wartość parametru. Dla braku rozróżnialności przyjęto wartość „0”. Jeśli badany parametr maleje na skutek uszkodzenia, wynikiem sprawdzenia jest „-1”, jeśli rośnie „1”. Sprawdzenia dokonano wg następującego modelu:

- 1) określenie czy zmiana parametru jest identyfikowalna po uwzględnieniu przedziału ufności:

$$\left| \bar{y}_0 - \bar{y}_n \right| > t_{\alpha_0} \frac{s_{y_0}^2}{\sqrt{n_0}} + t_{\alpha_n} \frac{s_{y_n}^2}{\sqrt{n_n}} \quad (11)$$

gdzie:

\bar{y}_0 – wartość średnia parametru odpowiadająca stanowi zdarności;

\bar{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 zdarności;

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

- 2) jeżeli wynikiem sprawdzenia jest liczba różna od „0” – ustalenie, czy wartość badanego parametru uległa zmniejszeniu czy też zwiększeniu na skutek uszkodzenia.

Jeśli wszystkie parametry mają wartość „0”, to obiekt jest zdalny. 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 określa się stan niezdatności 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 liczby 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 $(\overline{Ge} = 0)$ i $(G_{eM} = 0)$ i $(G_{emin} = 0)$ i $(G_{emax} = 0)$ i $(C_{Ge1} = 0)$ i $(C_{Ge2} = 0)$ i $(T_{sr} = 0)$ i $(T_M = 0)$ i $(T_{min} = 0)$ i $(C_{T1} = 0)$ i $(T_{max} = 0)$ i $(C_{T2} = 0)$, **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 $(\overline{Ge} = -1)$ i $(G_{eM} = -1)$ i $(G_{emin} = -1)$ i $(G_{emax} = -1)$ i $(C_{Ge1} = 1)$ i $(C_{Ge2} = 0)$ i $(T_{sr} = -1)$ i $(T_M = -1)$ i $(T_{min} = -1)$ i $(C_{T1} = 0)$ i $(T_{max} = -1)$ i $(C_{T2} = 0)$, **to stan** w_1^0 ;

Test uzupełniający w celu podwyższenia pewności diagnozy:

Jeżeli $(\overline{M_s} = 144,92 \pm 5,01 \text{ Nm})$ i $(M_s = 156,30 \pm 3,97 \text{ Nm})$ i $(M_{s0} = 143,70 \pm 5,05 \text{ Nm})$ i $(M_{si} = 118,50 \pm 4,29 \text{ Nm})$ i $(n_M = 2400 \pm 44 \text{ obr/min})$ i $(C_{M1} = 0,9194 \pm 0,0159)$ i $(C_{M2} = 0,7582 \pm 0,0081)$ i $(\overline{Ge} = 14,70 \pm 1,50 \text{ l/h})$ i $(G_{eM} = 12,95 \pm 0,11 \text{ l/h})$ i $(G_{emin} = 8,70 \pm 0,11 \text{ l/h})$ i $(G_{emax} = 19,60 \pm 0,25 \text{ l/h})$ i $(C_{Ge1} = 0,6721 \pm 0,0127)$ i $(C_{Ge2} = 0,6606 \pm 0,0145)$ i $(T_{sr} = 445 \pm 10^\circ\text{C})$ i $(T_M = 421 \pm 9^\circ\text{C})$ i $(T_{min} = 417 \pm 26^\circ\text{C})$ i $(C_{T1} = 0,9917 \pm 0,0373)$ i $(T_{max} = 473 \pm 7^\circ\text{C})$ i $(C_{T2} = 0,8891 \pm 0,0229)$, **to stan** w_1^0 ;

i analogiczne dla pozostałych stanów do w_6^0 .

Prawdopodobieństwo trafnej diagnozy oblicza się następująco:

$$p_d = \frac{n_1}{n} \cdot 100\% \geq p_{dgr}, \quad (12)$$

gdzie:

n_1 – liczba parametrów diagnostycznych, których wartość jest zbieżna z wartością wyznaczoną dla danego uszkodzenia;

n – całkowita liczba parametrów diagnostycznych;

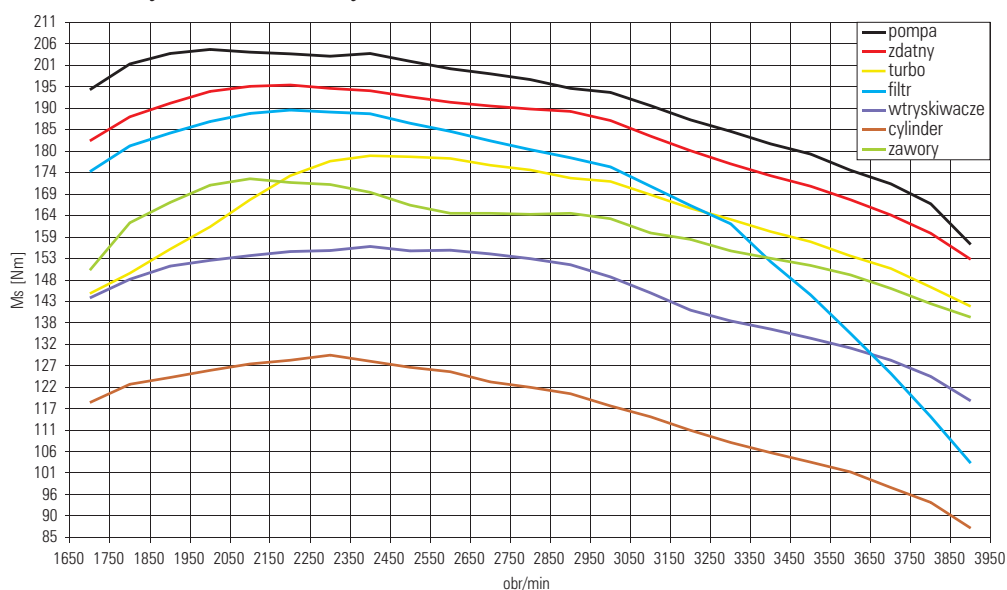
p_{dgr} – graniczne prawdopodobieństwo trafności diagnozy $p_{dgr} = 0,85$.

3. Wyniki badań

Badania wykonywano na hamowni silnikowej Instytutu Transportu Samochodowego. Pomiary przeprowadzono przy zdatnym silniku oraz pięciu uszkodzeniach, tzw. „słabych ogniw” silnika. Pomiary przeprowadzono w stanie ustalonym – przy stałych prędkościach obrotowych. Pomiar trwał 10 s, podczas których rejestracja sygnałów odbywała się z częstotliwością 10 Hz, po czym prędkość obrotową zwiększano o 100 obr/min. Badania przeprowadzono w zakresie prędkości obrotowych od 1700 do 3900 obr/min. Wyznaczone przebiegi są charakterystykami zewnętrznymi – wykonywanymi przy pełnym obciążeniu silnika.

Na rys. 2-4 przedstawiono wpływ uszkodzeń na charakterystyki momentu obrotowego i godzinowego zużycia paliwa, na hamowni silnikowej. W tabeli 1 zestawiono wartości uzyskanych parametrów diagnostycznych odpowiadających stanowi zdatności oraz poszczególnym uszkodzeniom. W tabeli 2 zestawiono wyniki testu rozróżnialności stanów dla poszczególnych uszkodzeń.

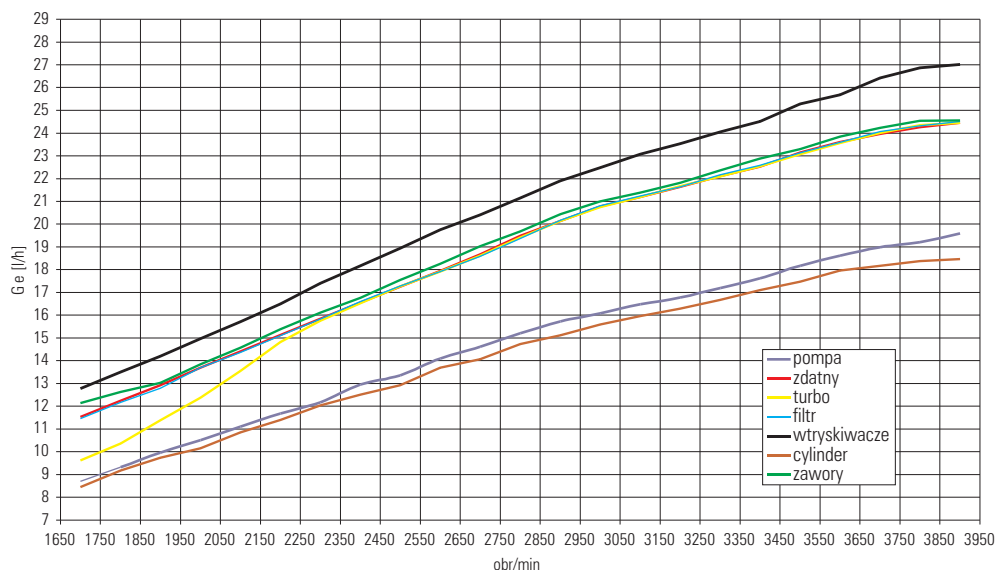
Z analizy zestawienia wynika, że:



Rys. 2. Wpływ uszkodzeń na charakterystykę momentu obrotowego silnika 4CTi90-1 BE6

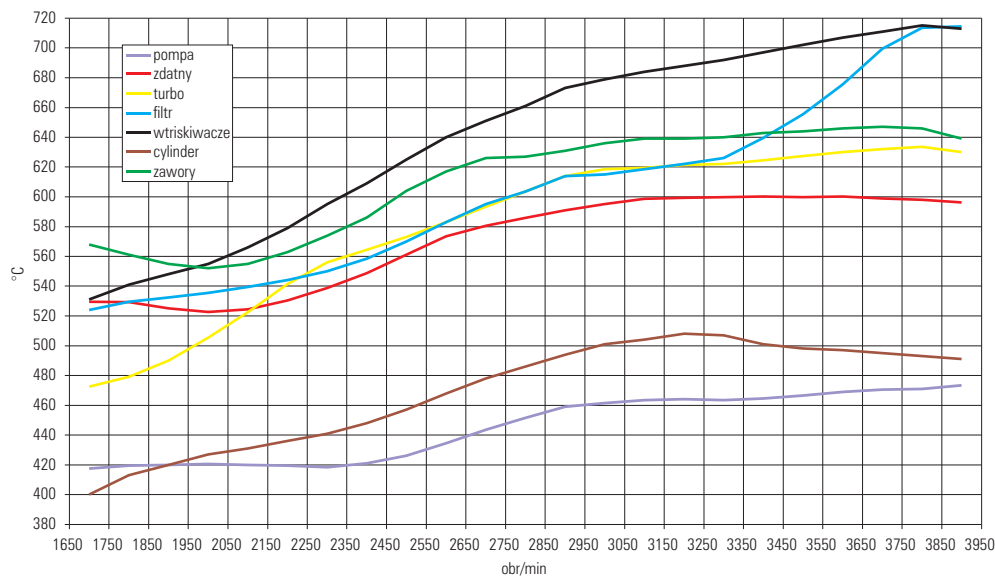
Źródło: opracowanie własne.

- 1) wyniki testu rozróżnialności stanu są różne dla poszczególnych uszkodzeń, co pozwala na ich lokalizację;
- 2) najbardziej informatywnymi parametrami są: \overline{M}_s , M_{s0} oraz T_{max} , dla których każde uszkodzenie wywołuje istotną zmianę ich wartości;



Rys. 3. Wpływ uszkodzeń na charakterystykę zużycia paliwa silnika 4CTi90-1

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4. Wpływ uszkodzeń na charakterystykę temperatury spalin silnika 4CTi90-1

Źródło: opracowanie własne.

- 3) najmniej informatywnym parametrem jest C_{MI} , C_{Ge2} , C_{TI} , C_{T2} – brak rozróżnialności dla czterech uszkodzeń;
- 4) najłatwiej identyfikowalne jest uszkodzenie korektora pompy wtryskowej i wtryskiwaczy. Oba uszkodzenia powodują istotną zmianę 15 parametrów;

- 5) najtrudniej identyfikowalne jest uszkodzenie polegające na nieszczelności przestrzeni nadłokowej. Powoduje ono istotną zmianę jedynie sześciu parametrów.

Tabela 1. Zestawienie wartości parametrów diagnostycznych silnika 4CTi90-1

	Korektor pompy	Turbo	Filtr powietrza	Wtryskiwacze	Cylinder	Nieszczelna komora spalania	Zdatny
\overline{M}_s	144,92	163,88	167,17	191,21	115,75	159,94	182,95
M_s	156,3	178,55	189,75	204,60	129,7	172,90	195,86
M_{s0}	143,7	144,75	174,65	194,70	118,1	150,50	182,18
M_{si}	118,5	141,65	103,2	156,80	87,3	139,00	153,16
n_M	2400	2400	2200	2000	2300	2100	2200
C_{M1}	0,9194	0,8107	0,9204	0,9516	0,9106	0,8704	0,9302
C_{M2}	0,7582	0,7933	0,5439	0,7664	0,6731	0,8039	0,782
\overline{Ge}	14,70	18,50	18,84	20,62	14,21	19,10	18,85
Ge_M	12,95	16,53	15,10	14,97	12,03	14,57	15,13
Ge_{min}	8,70	9,63	11,45	12,78	8,45	12,14	11,52
Ge_{max}	19,60	24,46	24,51	27,02	18,47	24,56	24,45
C_{Ge1}	0,6721	0,5824	0,7582	0,8539	0,7023	0,8328	0,7618
C_{Ge2}	0,6606	0,6757	0,6163	0,5539	0,6513	0,5934	0,6187
T_{sr}	445	580	602	641	469	610	570
T_M	421	564	544	555	441	555	530
T_{min}	417	472	524	531	400	568	529
C_{T1}	0,9917	0,837	0,9632	0,9568	0,907	1,0234	0,9985
T_{max}	473	630	714	713	491	639	596
C_{T2}	0,8891	0,896	0,7614	0,7784	0,8982	0,8685	0,8896

Źródło: opracowanie własne.

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

y/w		w^1	w_1^0	w_2^0	w_3^0	w_4^0	w_5^0	w_6^0
	Oznaczenia	Zdatny	Korektor pompy wtryskowej	Uszkodzona turbosprężarka	Uszkodzony filtr powietrza	Uszkodzone wtryskiwacze	Uszkodzony cylinder	Nieszczelna przestrzeń nadtlokowa
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	Ge_M	0	-1	1	0	1	-1	0
y_{10}	Ge_{\min}	0	-1	-1	-1	1	-1	0
y_{11}	Ge_{\max}	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
y_{14}	$T_{\acute{s}r}$	0	-1	0	0	1	-1	1
y_{15}	T_M	0	-1	1	0	1	-1	1
y_{16}	T_{\min}	0	-1	-1	0	0	-1	0
y_{17}	C_{T1}	0	0	-1	0	0	-1	0
y_{18}	T_{\max}	0	-1	1	1	1	-1	1
y_{19}	C_{T2}	0	0	0	-1	-1	0	0

Źródło: opracowanie własne.

4. Wnioski

Przedstawione wyniki badań i ich analizy dotyczą silnika pracującego przy pełnym obciążeniu – na charakterystyce zewnętrznej. Eksploatacja silników napędzających sprzęt pożarniczy, takich jak auto- i motopompy oraz agregaty prądotwórcze odbywa się w zakresie obciążeń częściowych. Zatem możliwe byłoby opracowanie wielowymiarowej macierzy diagnostycznej w funkcji prędkości obrotowej oraz obciążenia silnika. Jako parametry diagnostyczne mogłyby posłużyć wielkości związane z zużyciem paliwa i temperaturą spalin. Moment obrotowy, obliczany na podstawie parametrów roboczych pompy (ciśnienie i intensywność przepływu) lub agregatu (napięcie i prąd), służyłby w tym przypadku jako miara obciążenia.

Wyznaczenie ww. macierzy i algorytmów diagnozowania wymaga długotrwałych i bardzo obszernych badań eksperymentalnych.

Piśmiennictwo

- [1] Hebda M., Niziński S., Pelc H.: Podstawy diagnostyki pojazdów mechanicznych, WKŁ, Warszawa 1984.
- [2] Kupicz W.: Metoda diagnozowania silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym za pomocą momentu obrotowego wyznaczonego w warunkach trakcyjnych. Rozprawa doktorska, UWM, Olsztyn 2009.
- [3] Niziński S. i inni: Diagnostyka samochodów osobowych i ciężarowych, Dom Wydawniczy Bellona, Warszawa 1999.
- [4] Niziński S., Michalski R.: Diagnostyka obiektów technicznych, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Warszawa-Sulejówek-Olsztyn-Radom 2002.
- [5] Rychlik A.: Metoda pomiaru zużycia paliwa tłokowych silników spalinowych z wykorzystaniem zindywidualizowanych parametrów elektromagnetycznego wtrysku, *Eksploatacja i niezawodność* 2007, nr 2.
- [6] Żółtowski B.: Podstawy diagnostyki maszyn, Wydawnictwa Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy, Bydgoszcz 1996.

Summary

Włodzimierz KUPICZ

Paweł OGRODNIK

Engine Torque, Fuel Consumption Per Hour and Exhaust Gas Temperature as Diesel Engine Diagnostic Parameters under Stationary Conditions

The method of state control and engine damage localization of internal combustion engine working under stationary conditions has been developed on the basis of research results. The diagnostic parameters have been selected from the characteristics of engine torque, fuel consumption and exhaust gas temperature.

The presented results of research and their analysis refer to engine working at full load – on the power and torque curve. The operation of engines powering firefighting equipment like auto and motor pumps and also generators occur in the range of partial load. Therefore it is possible to develop a diagnostic multidimensional matrix to a function of rotation speed and engine load. The values of fuel consumption and exhaust gas temperature can be used as diagnostic parameters. The torque, calculated on the basis of the operational parameters of pump (pressure and intensity of circulation) or generator (voltage and electric current), may be used as load measure.