

Non-standard applications of the Horiba TEOM 1105 analyser

Abstract: Horiba TEOM 1105 analyser is originally dedicated to the PM emission measurement in the diesel engine exhaust gas. For last several years in the Combustion Engines Chair of Cracow University of Technology the attempts of non-standard application of the Horiba TEOM 1105 analyser have been leading. The article is the review of chosen examples of such applications. The measurements of PM emission in the exhaust gas of FSI engine fuelled with direct gasoline injection and the cases of measurements of PM emission in the exhaust gases of helicopter turbine engines have been presented.

Keywords: *PM emission, gasoline direct injection engine, turbine engine*

Nietypowe zastosowania analizatora Horiba TEOM 1105

Streszczenie: Analizator Horiba TEOM 1105 jest w założeniu przeznaczony do badania emisji cząstek stałych (PM) w spalinach silnika z zapłonem samoczynnym. Od kilku lat w Katedrze Silników Spalinowych Politechniki Krakowskiej prowadzone są próby nietypowych zastosowań analizatora cząstek stałych Horiba TEOM 1105. Niniejszy artykuł jest przeglądem wybranych przykładów takich zastosowań. Przedstawiono pomiary emisji cząstek stałych w spalinach silnika FSI zasilanego za pomocą bezpośredniego wtrysku benzyny oraz przypadki pomiarów emisji PM w gazach wylotowych śmigłowcowych silników turbinowych.

Słowa kluczowe: *emisja cząstek stałych, bezpośredni wtrysk benzyny, silnik turbinowy*

1. Wstęp

Analizator Horiba TEOM 1105 jest w założeniu przeznaczony do badania emisji cząstek stałych (PM) w spalinach silnika z zapłonem samoczynnym. Szczegółowy opis tego urządzenia został wcześniej przedstawiony między innymi w publikacjach [2, 3].

W związku z prowadzonymi w Katedrze Silników Spalinowych Politechniki Krakowskiej pracami badawczymi, podjęto próbę wykorzystania wspomnianego analizatora również do pomiarów stężenia cząstek stałych w spalinach silników innego typu. Podjęte działania dotyczyły zarówno silników tłokowych zamontowanych na stanowiskach badawczych w laboratorium, jak i silników turbinowych, które z racji swojej specyfiki mogły być badane jedynie w warunkach polowych. Te ostatnie przypadki wymagały odpowiedniego logistycznego przygotowania pomiarów. Należało zdemontować aparaturę, przetransportować ją na miejsce badań, a następnie zmontować ponownie. Moment rozpoczęcia pomiarów uzależniony był w decydującym stopniu od odpowiednich warunków atmosferycznych. W przypadku silników turbinowych Rolls-Royce Allison 250 śmigłowców Kania, będących w czynnej służbie jednostki policji, badania uzależnione były również od możliwości operacyjnych jednostki.

2. Silnik ZI z bezpośrednim wtryskiem paliwa (FSI)

Rozwój techniki i metod pomiarowych stwarza

nowe możliwości badawcze powodując, że w obszarach dotąd uważanych za „bezpieczne ekologicznie” pojawiają się nowe zagrożenia, które na danym etapie technicznym są identyfikowalne i mierzalne. Cząstki stałe emitowane przez silniki spalinowe mają złożoną strukturę i szerokie spektrum wymiarów, a za najgroźniejsze z punktu widzenia zagrożenia życia człowieka uważane są cząstki najmniejsze, niewidoczne dla oka.

Zjawisko emisji cząstek stałych (PM) w spalinach silników z zapłonem iskrowym (ZI) zostało zasygnalizowane z chwilą wprowadzenia układów bezpośredniego wtrysku paliwa jako alternatywy wielopunktowego wtrysku do kolektora dolotowego. Silniki wysokoprężne wcześniej objęto szczególnym monitoringiem w tym zakresie, gdyż przekroczenie regulacyjnej granicy dymienia było zauważalne już przy zastosowaniu metody wzrokowej, bez specjalnych urządzeń pomiarowych. Prawidłowo wyregulowany silnik ZI, szczególnie nowej generacji, nie pozwala na organoleptyczną ocenę emisji cząstek stałych PM, gdyż są one z racji swych rozmiarów niewidoczne dla oka. Do oceny tego parametru stosuje się skomplikowaną aparaturę, dostępną w ograniczonym zakresie ze względu na wysokie koszty.

Jednym z przedstawionych w niniejszym artykule nietypowych zastosowań analizatora Horiba TEOM 1105, była próba wykorzystania go do pomiaru emisji cząstek stałych w spalinach silnika ZI zasilanego benzyną za pomocą bezpośredniego wtrysku paliwa. Z badawczego punktu widzenia, interesujące było sprawdzenie, w jakim zakresie można do pomiarów emisji PM w spalinach silnika

ZI wykorzystać urządzenie dedykowane konstrukcyjnie do silników innego rodzaju. Do badań wybrano silnik Volkswagen FSI 1,4 z bezpośrednim wtryskiem benzyny, zamontowany na stanowisku pomiarowym w laboratorium Katedry Silników Spalinowych Politechniki Krakowskiej. Ogólny widok stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 1.



Fig. 1. Test stand with VW FSI 1,4 engine and Horiba TEOM 1105 analyser

Rys. 1. Stanowisko badawcze silnika VW FSI 1,4 z analizatorem Horiba TEOM 1105

Pomiarów emisji PM dokonano podczas wykonywania charakterystyki obciążeniowej silnika dla wybranej prędkości obrotowej 2300 1/min. Przykład zapisu cząstkowych wyników pomiarów dla obciążenia silnika 20 Nm oraz 60 Nm przedstawiono na rys. 2 i 3.

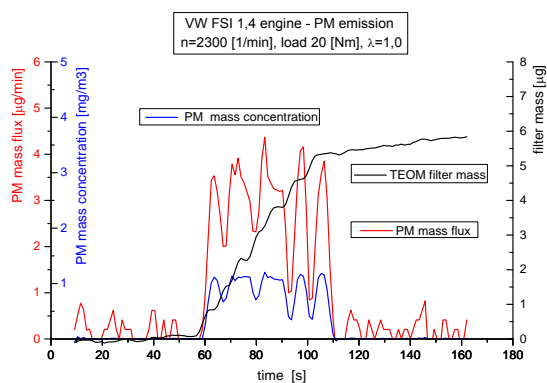


Fig. 2. Recorded values of PM emission in the VW FSI 1,4 engine exhaust gas; engine speed $n=2300$ 1/min, load 20 Nm, air excess number $\lambda=1,0$

Rys. 2. Zarejestrowane wartości emisji cząstek stałych PM w spalinach silnika VW FSI 1,4; prędkość obrotowa silnika $n=2300$ 1/min, obciążenie 20 Nm, wsp. nadmiaru powietrza $\lambda=1,0$

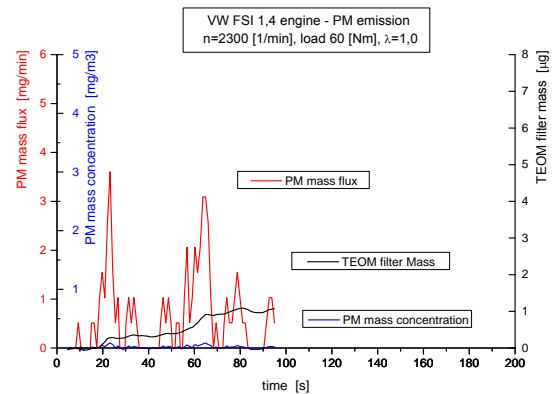


Fig. 3. Recorded values of PM emission in the VW FSI 1,4 engine exhaust gas; engine speed $n=2300$ 1/min, load 60 Nm, air excess number $\lambda=1,0$

Rys. 3. Zarejestrowane wartości emisji cząstek stałych PM w spalinach silnika VW FSI 1,4; prędkość obrotowa silnika $n=2300$ 1/min, obciążenie 60 Nm, wsp. nadmiaru powietrza $\lambda=1,0$

Charakterystyka obciążeniowa silnika FSI dotycząca emisji PM przy zasilaniu benzyną została przedstawiona na rys. 4. W zakresie średniego obciążenia, tzn. ok. 50-80 Nm, emisja i stężenie cząstek stałych PM w spalinach były najmniejsze. Zmierzona wartość stężenia PM wynosiła ok. $0,01$ mg/m^3 , a wartość emisji utrzymywała się na poziomie ok. $0,2$ - $0,3$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$. W zakresie małego obciążenia silnika zaobserwowano lokalne maksimum wartości stężenia i emisji PM, osiągające wartości odpowiednio - ok. $0,8$ mg/m^3 i 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

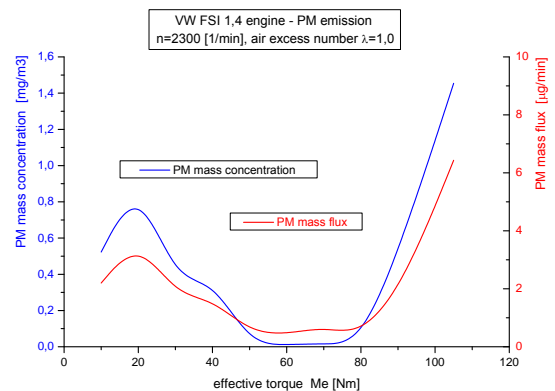


Fig. 4. Load characteristic of VW FSI 1,4 engine – exhaust gas PM emission

Rys. 4. Charakterystyka obciążeniowa silnika VW FSI 1,4 – emisja cząstek stałych PM w spalinach

Pomiar emisji cząstek stałych w silniku z zapłonem iskrowym przy pomocy analizatora Horiba TEOM 1105 jest możliwy, ale zmierzone minimalne wartości stężenia PM leżą praktycznie blisko „rozdzielczości” przetwornika masy w analizatorze. Stąd wyniki pomiarów, szczególnie w zakresie średniego obciążenia, należy uznać za obarczone dużym błędem.

Integralną częścią analizatora jest mikro-tunel rozcieńczający służący do poboru próbki spalin

według procedury normatywnej dla CVS (Constant Volume Sampling). Najmniejszą możliwą do uzyskania wartością stopnia rozcieńczenia spalin jest ok. 7. Stąd wynika mały strumień cząstek osadzanych na filtrze TEOM. Przy obecnej konfiguracji układu pomiarowego, tzn. fabrycznemu oprogramowaniu i wydatkowi zestawu zaworów pneumatycznych, nie jest możliwe zastosowanie mniejszych wartości stopnia rozcieńczenia.

3. Silnik turbinowy GTD-350

Kolejną próbą nietypowej aplikacji analizatora Horiba TEOM 1105 były pomiary emisji cząstek stałych PM w gazach wylotowych turbinowego silnika śmigłowego GTD-350 [5]. Silniki tego typu stosowane są między innymi w śmigłowcach Mi-2, gdzie stanowią źródło napędu wirnika nośnego i pomocniczego.

Silnik GTD-350 został zamontowany na stanowisku pomiarowym umożliwiającym wykonanie badań w warunkach polowych, przedstawionym na rys. 5.



Fig. 5. Plan view of the measuring stand with GTD-350 engine

Rys. 5. Widok ogólny stanowiska pomiarowego z silnikiem GTD-350

Rejestracja emisji cząstek stałych w gazach wylotowych silnika GTD-350 została wykonana podczas zbliżonej do standardowej dla lotnictwa procedury obciążenia silnika przedstawionej na rys. 6.

Wyniki pomiarów emisji cząstek stałych PM przedstawiono na rys. 7. W tym przypadku strumień cząstek odpowiadał czułości pomiarowej analizatora i uzyskano wiarygodne wyniki.

Przebiegi mierzonych wielkości odpowiadają stanom obciążenia silnika. W fazie rozruchu, emisja cząstek stałych widoczna jest w postaci piku strumienia PM na wykresie. Jest to efekt zwiększonej dawki paliwa, które nie ulega jeszcze w pełni spalaniu. Zakres ustabilizowanej pracy (MG) charakteryzuje się relatywnie ustabilizowaną emisją cząstek stałych. Wybieg wirnika turbosprężarki po odcięciu dopływu paliwa (wyłączeniu silnika) charakteryzu-

je się szybkim zmniejszeniem się stężenia cząstek w rurze wylotowej. Zjawisko dymienia z układu wylotowego w ostatnim etapie testu, tzn. po zatrzymaniu wirnika, znalazło odbicie w zarejestrowanych niewielkich wartościach stężeń cząstek w pobranej próbce spalin.

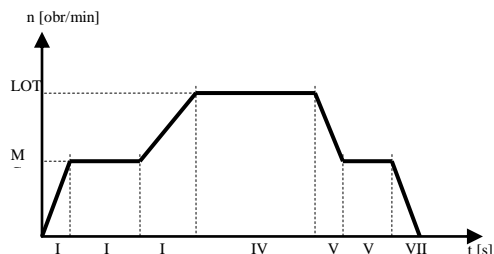


Fig. 6. Program of the GTD-350 engine test; MG – low load range, LOT – flight range

Rys. 6. Program próby silnika GTD 350; MG – zakres małego gazu, LOT – zakres LOT

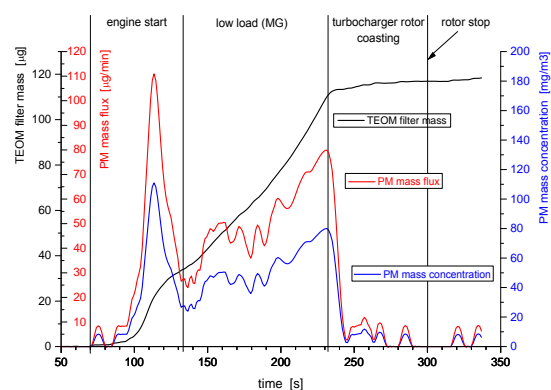


Fig. 7. Recorded values of PM emission in the GTD-350 engine exhaust gases during "aviation" load procedure

Rys. 7. Zarejestrowane wartości emisji cząstek stałych PM w gazach wylotowych silnika GTD-350 podczas „lotniczej” procedury obciążenia

Wykonane próbne testy wykazały, że analizator Horiba TEOM 1105 można wykorzystać do pomiarów zawartości cząstek stałych PM w gazach wylotowych również silnika turbospalinowego, gdzie czułość przyrządu odpowiada koncentracji cząstek w spalinach.

4. Silnik turbinowy Rolls-Royce Allison 250

Przedstawione wyżej wyniki badań umożliwiły podjęcie decyzji o użyciu analizatora TEOM do pomiaru emisji cząstek stałych w gazach wylotowych silników turbinowych Rolls-Royce Allison 250 wykonano w ramach realizacji Projektu Badawczego Nr 0 N504 015835 pt.: „Kompleksowa metoda diagnozowania układu łożyskowania turbinowego silnika śmigłowego (na przykładzie silnika Rolls-Royce Allison 250)”.

Wstępne badania emisji cząstek stałych PM zakończyły się niepowodzeniem z powodu złych

warunków atmosferycznych. Procedura wstępnego kondycjonowania aparatury nie wystarczyła do utrzymania właściwych parametrów pracy analizatora podczas pomiarów. Na rys. 8 przedstawiono zarejestrowane wartości zmian stężenia i strumienia masy PM w gazach wylotowych silnika. Otrzymane przebiegi były bezużyteczne z punktu widzenia potrzeb badań, ale stanowiły wskazówkę na przyszłość dotyczącą zwrócenia szczególnej uwagi na wybór odpowiednich warunków atmosferycznych i sposobu przygotowania badań.

Posiadając doświadczenie z prezentowanych wyżej wstępnych badań, przystąpiono do pomiarów emisji gazów wylotowych silników Rolls-Royce Allison 250 z zastosowaniem analizatora Horiba TEOM 1105 według skorygowanej procedury. Równoległe były mierzone przy pomocy analizatora Horiba Mexa 1500GH, gazowe składniki spalin [6]. Stanowisko badawcze przy śmigłowcu PZL Kania przedstawiono na rys. 9.

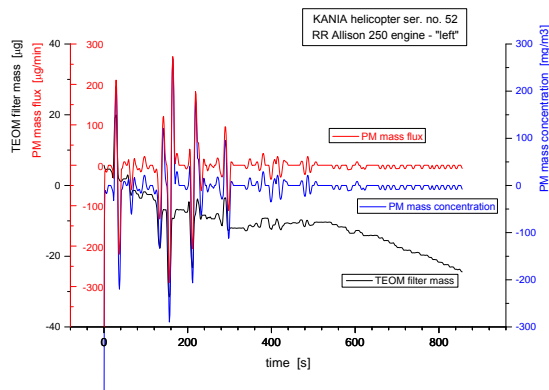


Fig. 8. Recorded values of PM emission in the exhaust gases of RR Allison 250 engine – unsuccessful measurement because of the atmospheric conditions

Rys. 8. Zarejestrowane wartości parametrów emisji cząstek stałych PM w gazach wylotowych silnika RR Allison 250 – pomiar nieudany z powodu złych warunków atmosferycznych

Analiza spalin przeprowadzona w zakresie szczególnie PM miała posłużyć do diagnozowania stanu technicznego silnika turbospalinowego [1], [4]. Dokonano porównania stężenia składników spalin czterech silników stanowiących napęd dwóch śmigłowców. Celem było poszukiwanie korelacji pomiędzy stopniem zużycia i ewentualnymi usterkami silników a emisją cząstek stałych w gazach wylotowych [7].

Przykładowy wykres przebiegów wartości stężeń gazowych składników spalin i opowiadających im wartości emisji cząstek stałych PM w gazach wylotowych silnika RollsRoyce Allison 250 śmigłowca PZL Kania przedstawiono na rys. 10 i 11.

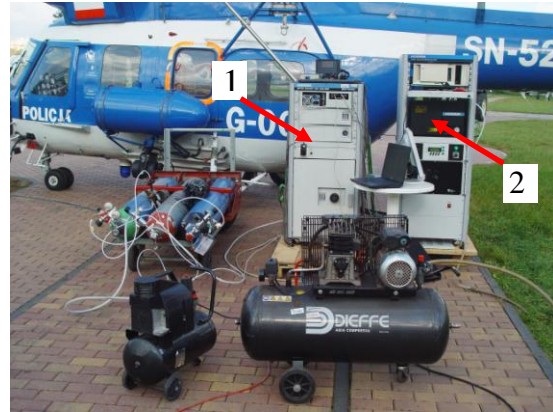


Fig. 9. Test stand at the PZL Kania helicopter: 1- Horiba MEXA 1500GH, 2- Horiba TEOM 1105 analyser with Micro Diluter 6100

Rys. 9. Stanowisko pomiarowe przy śmigłowcu PZL Kania: 1- analizator Horiba MEXA 1500GH, 2- analizator TEOM 1105 HORIBA z mini-tunelem rozcieńczającym Micro Diluter 6100

Równoczesny pomiar stężeń gazowych składników spalin pozwolił na określenie wartości globalnego współczynnika nadmiaru powietrza λ , przy którym pracowały badane silniki (rys. 10). Wartość λ zawierała się w przedziale około 4–5, czyli mieściła się w przedziale typowym dla silnika wysokoprężnego. Stąd i z zastosowania paliwa o podobnym składzie chemicznym, wynikały właściwe wskazania analizatora TEOM, jako urządzenia dedykowanego do silników ZS.

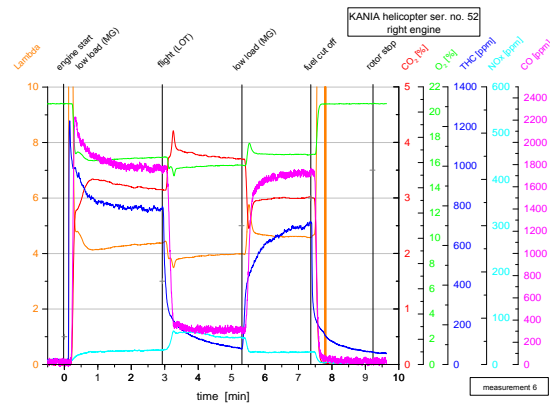


Fig. 10. Recorded run of exhaust gas components concentration of RR Allison 250 engine

Rys. 10. Zarejestrowany przebieg zmian stężeń składników spalin silnika RR Allison 250

Zebrane wyniki stały się podstawą opracowania sposobu określania wskaźnika stanu technicznego $S_{CS}(\theta)$, opisanego szerzej w artykule [8].

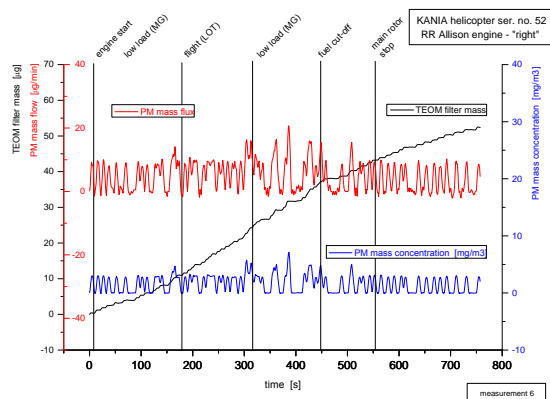


Fig. 11. Example of the record of PM concentration in the exhaust gases of RR Allison 250 engine

Rys. 11. Przykład zapisu stężenia cząstek stałych w gazach wylotowych silnika RR Allison 250

Zawartość cząstek stałych w gazach wylotowych silnika turbinowego można traktować, jako funkcjonalny sygnał diagnostyczny $CS(t)$. Masa filtra analizatora TEOM, na którym osadzają się cząstki stałe, mierzona jest w stałych odstępach czasu Δt . Wyniki pomiarów przedstawiane są w postaci wartości liczbowej na wykresie $CS(t)$ (gdzie $t = i \cdot \Delta t$), a ponieważ za każdym razem mierzona jest całkowita masa filtra, funkcja $CS(t)$ jest niemalejąca.

Funkcjonalny sygnał diagnostyczny $CS(t)$ można zdefiniować w następująco:

$$CS(t) = \sum_{i=1}^n \Delta CS(i \cdot \Delta t)$$

gdzie: $n \cdot \Delta t = tr$ – czas rejestracji.

Wynikiem pomiaru diagnostycznego jest charakterystyka przedstawiająca przebieg w określonym przedziale czasu $(0, tr)$ wielkości fizycznej, a nie wartość liczbową sygnału diagnostycznego, stanowiąca obraz stanu technicznego danego obiektu w chwili pomiaru.

Wartość odniesienia (progowa) funkcjonalnego sygnału diagnostycznego jest to największa wartość funkcjonalnego sygnału diagnostycznego generowanego przez sprawny obiekt techniczny przy oddziaływaniach zewnętrznych, które nie przekraczają wartości dopuszczalnych. Jeżeli wartość funkcjonalnego sygnału diagnostycznego przekracza wartość progową, oznacza to, że pojawiła się przyczyna (stała lub chwilowa) powodująca zmianę działania obiektu, wynikająca z degradacji stanu technicznego lub niekorzystnego oddziaływania otoczenia.

Wartość dopuszczalna funkcjonalnego sygnału diagnostycznego jest wartością graniczną, nieprzekraczalną w całym okresie eksploatacji obiektu technicznego. Osiągnięcie wartości dopuszczalnej powoduje natychmiastowe przerwania użytkowania do czasu ustalenia i usunięcia przyczyny, która ten wzrost spowodowała.

W celu wyznaczenia wartości progowej należy wyznaczyć wartości przyrostów zawartości cząstek

stałych PM w kolejnych okresach pomiarowych Δt , czyli wyznaczyć przebieg zależności $\Delta CS(\Delta t)$:

$$\Delta CS(\Delta t) = CS(i \cdot \Delta t) - CS[(i-1) \Delta t]$$

Jeżeli w badaniach diagnostycznych korzysta się ze sprawnego technicznie silnika, to wartość progową sygnału $\Delta CS(\Delta t)$ wyznacza się następująco:

$$\Delta CS_{pr} = \mu_{\Delta CS} + 3\sigma_{\Delta CS}$$

gdzie: ΔCS_{pr} – wartość progowa sygnału diagnostycznego, $\mu_{\Delta CS}$, $\sigma_{\Delta CS}$ – parametry rozkładu normalnego wartości przyrostów sygnału $\Delta CS(\Delta t)$ wyznaczone dla każdego badanego silnika.

Na rys. 12 i 13 przedstawiono przykładowe przebiegi funkcjonalnych sygnałów diagnostycznych $\Delta CS(\Delta t)$ zarejestrowanych dla silników turbinowych RollsRoyce Allison 250 zamontowanych na śmigłowcach PZL Kania.

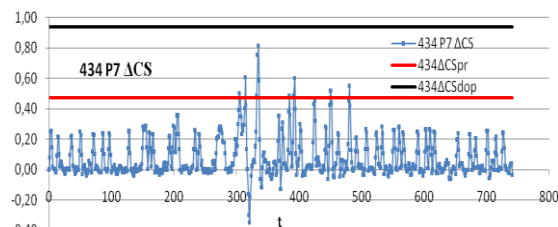


Fig. 12. Run of the functional diagnostic signal $\Delta CS(\Delta t)$ – RR Allison 250 no.1, ΔCS_{pr} – threshold value of the diagnostic signal, ΔCS_{dop} – permissible value of the diagnostic signal

Rys. 12. Przebieg funkcjonalnego sygnału diagnostycznego $\Delta CS(\Delta t)$ – silnik RR Allison 250 nr 1, ΔCS_{pr} – wartość progowa sygnału diagnostycznego, ΔCS_{dop} – wartość dopuszczalna sygnału diagnostycznego

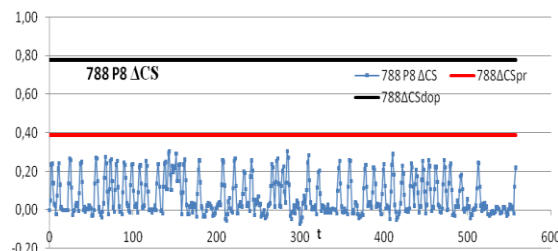


Fig. 13. Run of the functional diagnostic signal $\Delta CS(\Delta t)$ – RR Allison 250 no.3, ΔCS_{pr} – threshold value of the diagnostic signal, ΔCS_{dop} – permissible value of the diagnostic signal

Rys. 13. Przebieg funkcjonalnego sygnału diagnostycznego $\Delta CS(\Delta t)$ – silnik RR Allison 250 nr 3, ΔCS_{pr} – wartość progowa sygnału diagnostycznego, ΔCS_{dop} – wartość dopuszczalna sygnału diagnostycznego

Stan techniczny uszczelnień łożysk silnika turbinowego można określić na podstawie zawartości cząstek stałych PM w gazach wylotowych za pomocą poniższego wzoru:

$$S_{CS}(\Delta t) = 1 - \frac{P(\Delta t)}{P_{dop}}$$

Tak zdefiniowany wskaźnik stanu $S_{CS}(\Delta t)=1$, jeżeli sygnał $\Delta CS(\Delta t)$ nie przekracza wartości progowej ($\Delta CS(\Delta t) < \Delta CS_{pr}$).

Jeżeli pojawi się jedno lub więcej przekroczeń mniejszych od dopuszczalnego ΔCS_{dop} , wskaźnik przyjmuje wartości z przedziału (0, 1) ($0 < S_{CS}(\Delta t) < 1$).

W przypadku wystąpienia przekroczenia dopuszczalnego – wskaźnik stanu $S_{CS}(\Delta t)=0$. Oznacza to konieczność przerwania użytkowania silnika do czasu usunięcia przyczyny, która to przekroczenie wywołała.

Wskaźnik stanu technicznego S_{CS} dla całej rejestracji w dziedzinie długiego czasu eksploatacji Θ określono następująco:

$$S_{CS}(\theta) = \sqrt[k]{\prod_{i=1}^k S_{CSi}(\Delta t)}$$

gdzie: k – liczba okresów pomiarowych Δt , w których pojawiło się przekroczenie wartości progowej ΔCS_{pr} w czasie rejestracji sygnału $\Delta CS(\Delta t)$ po czasie θ użytkowania silnika.

Wartości wskaźników stanu technicznego $S_{CS}(\theta)$ dla rejestracji emisji PM wykonanych dla czterech badanych silników RollsRoyce Allison 250 przedstawiono w Tabeli 1.

Table 1. Technical state index $S_{CS}(\theta)$ determined on the base of the threshold exceeding values of the functional diagnostic signal $\Delta CS(\Delta t)$ for RR Allison 250 engines
Tabela 1. Wskaźnik stanu technicznego $S_{CS}(\theta)$ wyznaczony na podstawie przekroczeń wartości progowych funkcjonalnego sygnału diagnostycznego $\Delta CS(\Delta t)$ dla silników RR Allison 250

Time [Θ]	Engine No.			
	1	2	3	4
	Technical State Index $S_{CS}(\theta)$			
2522	0,9402	1,0000		
2545	0,8736	0,9306		
2790			1,0000	0,8936
2806			1,0000	1,0000

Na uwagę zasługuje silnik nr 3, w którym nie zarejestrowano przekroczeń wartości progowych sygnału diagnostycznego $\Delta S_{CS}(\theta)$, stąd wartości wskaźnika stanu technicznego $S_{CS}(\theta)$ wynoszą w obu przypadkach 1,00. W pozostałych przypadkach wystąpiły przynajmniej raz przekroczenia wartości progowych sygnału diagnostycznego $\Delta S_{CS}(\theta)$, co skutkuje wartością wskaźnika stanu technicznego $S_{CS}(\theta)$ z przedziału 0,0 do 1,0.

5. Wnioski

Analizator cząstek stałych Horiba TEOM 1105 jest przeznaczony do badania zawartości cząstek stałych w spalinach silników wysokoprężnych. Przedstawione przykłady wykazały jednak możliwość zastosowania tego analizatora także do badań silników innego typu:

- pomiar zawartości PM w spalinach silnika z zapłonem iskrowym jest utrudniony ze względu na mały strumień tych cząstek, co powoduje, że zmierzone wartości stężeń w niektórych zakresach obciążenia silnika mogą być obarczone błędem. Problemem przy pomiarze emisji cząstek stałych jest zbyt duży, dla tego typu silnika, stopień rozcieńczenia próbki spalin. Bez zmiany obecnej konfiguracji i wydatku zaworów pneumatycznych mikro-tunelu rozcieńczającego i zmiany oprogramowania, nie jest możliwe uzyskanie mniejszych wartości stopnia rozcieńczenia,
- badania emisji cząstek stałych w gazach wylotowych silników turbinowych potwierdziły pełną przydatność analizatora do tego celu. Średni współczynnik nadmiaru powietrza, przy którym odbywa się spalanie w silniku turbospalinowym oraz zastosowane paliwo - nafta lotnicza powodują, że warunki pomiaru są podobne do silnika z zapłonem samoczynnym, a wyniki wiarygodne.

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

PM Particulates Matter/*cząstki stałe*
CVS Constant Volume Sampling/*próbkiwanie metodą CVS*

CS(t) Functional Diagnostic Signal/*funkcjonalny sygnał diagnostyczny*
 $S_{CS}(\theta)$ Technical State Index/*wskaźnik stanu technicznego*

Bibliography/*Literatura*

- [1] Magier J.: The estimation of technical state of helicopter turbine engine bearing system, PTNSS Congress, Cracow 2007.
- [2] Golomb P.: New Method for Particulate Matter Measurement with TEOM Diesel Particulate Mass Monitor, PTNSS Congress, Cracow 2007.
- [3] Dutczak J.: Application Of The TEOM Analyser To SI Engine Particulates Emissions Measurement, International Congress Motor Vehicles & Motors 2008, Kragujevac 2008.
- [4] Dutczak J., Magier J.: Conception of evaluation of technical state of turbine engine elements on the base of exhaust gases chemical composition changes, Combustion Engines / Silniki Spalinowe nr 2009-SC1, PTNSS June 2009.
- [5] Dutczak J.: Investigation of the particle matter emission in the exhaust gas of the GTD-350 turbine engine, Combustion Engines / Silniki Spalinowe nr 3/2011, art. nr PTNSS-2011-SC-173.
- [6] Dutczak J., Magier J., Mareczek M., Papuga T., Śliwiński K.: Investigation of the exhaust gas components emission of the Rolls-Royce Allison 250 turbine engine in aspect of the engine technical state evaluation, IV International PTNSS Congress, Radom 2011.
- [7] Dutczak J., Magier J., Mareczek M., Papuga T., Śliwiński K.: Monografia - Analiza emisji składników gazów wylotowych w aspekcie diagnozowania układu łożyskowania. Rozdział 6 - Problemy kompleksowego diagnozowania układu łożyskowania turbinowego silnika śmigłowcowego, str. 95-123, Warszawa 2011.
- [8] Dutczak J., Magier J.: The assessment of the technical condition of the bearing seals of the rotor shaft in a turbine helicopter engine based on the PM content in the exhaust gases, Combustion Engines 3/2012, s. 44-54.

Mr Jerzy Dutczak, DEng. – Doctor in the Combustion Engines Chair of Automobiles and Internal Combustion Engines Institute at Cracow University of Technology.

Dr inż. Jerzy Dutczak – adiunkt w Katedrze Silników Spalinowych na Wydziale Mechanicznym Politechniki Krakowskiej.

