

## Investigation of the particle matter emission in the exhaust gas of the GTD-350 turbine engine

*Abstract: The preliminary investigations of particle matter emission in the exhaust gas of GTD-350 turbine engine have been presented in article. Investigations have been led on the test stand by use of particle analyzer TEOM Horiba, equipped with Micro Diluter 6100. The aim of investigations was to check the usability of that analyzer to evaluation of one of the turbine engine exhaust gas parameters. The measurements were performed after previous adaptation of that analyzer originally dedicated to piston internal combustion engines.*

Key words: turbine engine, exhaust gas emission, particle matter (PM)

### Badania emisji cząstek stałych w gazach wylotowych silnika turbospalinowego GTD-350

*Streszczenie: W artykule przedstawiono wstępne badania emisji cząstek stałych w gazach wylotowych silnika turbospalinowego GTD-350. Badania przeprowadzono na stanowisku pomiarowym przy użyciu analizatora cząstek stałych TEOM Horiba wyposażonego w mini-tunel rozcieńczający Micro Diluter 6100. Celem badań było sprawdzenie przydatności tego analizatora do oceny jednego z parametrów gazów wylotowych silnika turbospalinowego. Pomiary wykonano po uprzedniej adaptacji analizatora, przeznaczonego w założeniu do badań silników tłokowych.*

Słowa kluczowe: silnik turbospalinowy, emisja spalin, cząstki stałe

#### 1. Wstęp

Zdecydowaną większość źródeł napędu w transporcie lotniczym stanowią silniki turboodrzutowe i turbospalinowe. Emisja spalin z tych silników przyczynia się do wzrostu zanieczyszczenia środowiska naturalnego, podobnie jak emisja spalin z silników tłokowych stosowanych w transporcie lądowym. Ekologiczne aspekty napędów lotniczych stają się przedmiotem zainteresowania konstruktorów i ośrodków badawczych, szczególnie z powodu szybko wzrastającej liczby eksploatowanych w lotnictwie cywilnym samolotów i śmigłowców. Prezentowane prace dotyczące badań emisji składników spalin silnika turbospalinowego GTD-350 stanowią przyczynek do wiedzy na temat wpływu silników przepływowych turbospalinowych na skażenie środowiska naturalnego.

Badania niniejsze zostały poprzedzone wstępnym rozpoznaniem przedziału wartości stężenia poszczególnych składników spalin i zweryfikowaniem sposobu poboru próbki spalin w przewodach wylotowych silnika. Wykonano pomiary w przypadkach różnych punktów poboru próbek z przewodów wylotowych silnika dla określenia rozkładu stężeń związków w przekroju poprzecznym strumienia spalin. Do określenia stężenia objętościowego składników gazowych spalin silnika GTD-350 użyto analizatora pięciogazowego AI 9600, a do określenia stopnia zadymienia spalin – dymomierza filtracyjnego typu BOSCH.

Na podstawie wyników pomiarów sformułowano wnioski dotyczące dalszych działań. Stwierdzono między innymi, że:

- ze względu na znaczny stopień turbulencji spalin w układzie wylotowym, miejsce poboru próbki spalin w przekroju poprzecznym przewodu wylotowego nie ma istotnego wpływu na wyniki pomiarów;
- zakres pomiarowy użytych przyrządów jest odpowiedni do wyznaczenia stężenia tlenu węgla, dwutlenku węgla i tlenu. W przypadku kontynuacji prac, konieczne będzie jednak zastosowanie przyrządów o większej czułości do określenia stężenia tlenków azotu i węglowodorów;
- stopień zadymienia spalin jest niewielki, w stosunku do wartości spotykanych w silnikach tłokowych, stąd też konieczność stosowania czułych metod pomiarowych. W przypadku badań silnika w warunkach zmiennego obciążenia, konieczne jest stosowanie dymomierzy pozwalających na ciągły pomiar stopnia zadymienia spalin. Metody filtracyjne nie spełniają tych wymagań.

W prezentowanych poniżej pracach skupiono się wyłącznie na zagadnieniu emisji cząstek stałych. Wnioski z badań rozpoznawczych stanowiły podstawę podjęcia próby zastosowania analizatora Horiba TEOM, umożliwiającego pomiar stężenia cząstek stałych w spalinach silnika GTD-350 i rejestrację wyników w sposób ciągły.

## 2. Stanowisko badawcze i aparatura pomiarowa

Obiektem badań był turbinowy silnik śmigłowiec GTD-350 zamontowany na mobilnym stanowisku pomiarowym, przedstawionym na Rys. 2.1. Schematyczny przekrój silnika GTD-350 przedstawiono na Rys. 2.2.

Dwa silniki GTD-350 połączone wspólną przekładnią mechaniczną przekazują moment obrotowy na wał wirnika nośnego i pomocniczego śmigłowca Mi-2 stosowanego w jednostkach wojsk lotniczych oraz w lotnictwie sanitarnym i ratowniczym. Podstawowe dane techniczne silnika GTD-350 przedstawiono w Tabeli 2.1.

W badaniach zastosowano system pomiarowy

Tabela 2.1. Podstawowe dane techniczne silnika GTD-350

Table 2.2. Basic technical data of GTD-350 engine

|   | Zakres startowy | Zakres nominalny | Zakresy przelotowe |           | Mały gaz (wartości zmierzone)            |
|---|-----------------|------------------|--------------------|-----------|--|
|   |                 |                  | I                  | II        |  |
| Moc na wale wyjściowym [ kW / KM ]                  | 294 / 400       | 235 / 320        | 209 / 285          | 173 / 235 | ---                                      |
| Prędkość obrotowa turbiny sprężarki, [ % obr. max ] | 96              | 90               | 87,5               | 84,5      | 57                                       |
| Prędkość obrotowa turbiny napędowej, [ % obr. max ] | 97              | 101              | max 104            | max 104   | 62                                       |
| Temperatura gazów przed turbiną sprężarki, [ °C ]   | 940             | 860              | 840                | 800       | 790                                      |
| Jednostkowe zużycie paliwa, max. [ g / kWh ]        | 496             | 530              | 557                | 605       | Godzinowe zużycie paliwa max 55 [ kg/h ] |

100% prędkości obrotowej turbiny sprężarki odpowiada 45000 obr/min.

100% prędkości obrotowej turbiny napędowej odpowiada 24000 obr/min.

100% prędkości obrotowej turbiny napędowej odpowiada 5900 obr/min wału do napędu przekładni głównej śmigłowca.

firmy HORIBA oparty na elementach produkowanych przez firmę Rupprecht & Patashnick Co. Inc. System składa się z mikrowagi oscylacyjnej (TEOM) oraz układu rozcieńczania spalin (Micro Diluter) połączonego z mini-tunelem rozcieńczającym. Urządzenie wchodzi w skład aparatury pomiarowej

stanowiącej wyposażenie Katedry Silników Spalinowych Politechniki Krakowskiej.

Analizator TEOM nie jest standardowym instrumentem badawczym stosowanym w dziedzinie lotniczych silników przepływowych. Jest to urządzenie służące do pomiaru emisji cząstek stałych w spalinach silników tłokowych – głównie silników z zapłonem samoczynnym. Z tego powodu należało dokonać adaptacji całego układu do potrzeb badanego silnika, łącznie z zapewnieniem pracy w warunkach pomiarów polowych, z jakimi miano do czynienia w tym przypadku.

Mikrowaga oscylacyjna TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance) [1] [3] wyznacza na zasadzie grawimetrycznej masę cząstek stałych w przepływającym strumieniu gazów. Ustalony stały wydatek objętościowy rozcieńczonych gazów

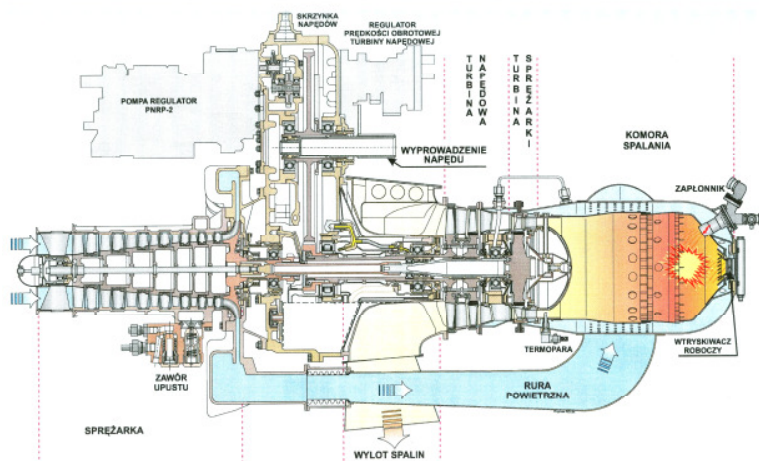
wylotowych z silnika spalinowego przepływa przez specjalny filtr wykonany z włókien szklanych pokrytych teflonem. Masa filtra jest mierzona w sposób ciągły i rejestrowana przez system. Kalibracja wagi polega na pomiarze masy „czystego” filtra bezpośrednio przed rozpoczęciem właściwych pomiarów. Różnica pomiędzy masą filtra z osadzonymi cząstkami a masą czystego filtra jest wartością masy cząstek stałych osadzonych w czasie testu. Widok wnętrza otwartej obudowy przetwornika masy TEOM przedstawiono na rys. 2.3.

Stosowana obecnie w dziedzinie tłokowych silników spalinowych z zapłonem samoczynnym metoda określania emisji cząstek stałych opiera się na wytycznych amerykańskiej Agencji Ochrony Środowiska (EPA).

Pollega ona na grawimetrycznym pomiarze ilości cząstek osadzonych na specjalnym filtrze, przez który przepływa strumień rozcieńczonych spalin, a metoda pomiarowa nosi nazwę CVS (Constant Volume Sampling).



Rys.2.1. Mobilne stanowisko pomiarowe z silnikiem GTD 350, widoczny zasilacz rozruchowy  
 Fig. 2.1. Mobile measuring stand with GTD-350 engine; visible electric starting feeder



Rys. 2.2. Schematyczny przekrój silnika GTD-350  
 Fig. 2.2. Schematic cross-section of GTD-350 engine

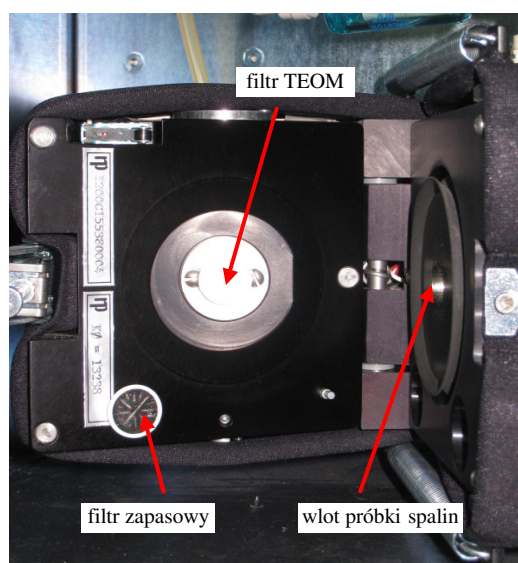
Pełnowymiarowy układ pomiarowy CVS pozwala uzyskać wiarygodne rezultaty badań, ale jego znaczne wymiary powodują, że jest on używany prawie wyłącznie w badaniach laboratoryjnych. Te ograniczenia doprowadziły do opracowania i zastosowania tzw. mini-tunelu rozcieńczającego MDT (Mini Dilution Tunnel). Jest to urządzenie znacznie mniejsze i niezależne od infrastruktury zewnętrznej laboratorium. Zasada działania MDT jest podobna do systemu CVS, ale jego małe rozmiary czynią go wygodniejszym w użyciu, umożliwiają pewną mobilność i łatwiejszą adaptację do potrzeb laboratoryjnych. Sposób postępowania jest również podobny do systemu CVS, lecz w tym przypadku rozcieńczany jest tylko ułamek całego strumienia spalin wpływających z silnika.

Mini-tunel rozcieńczający wykorzystuje zwęż-

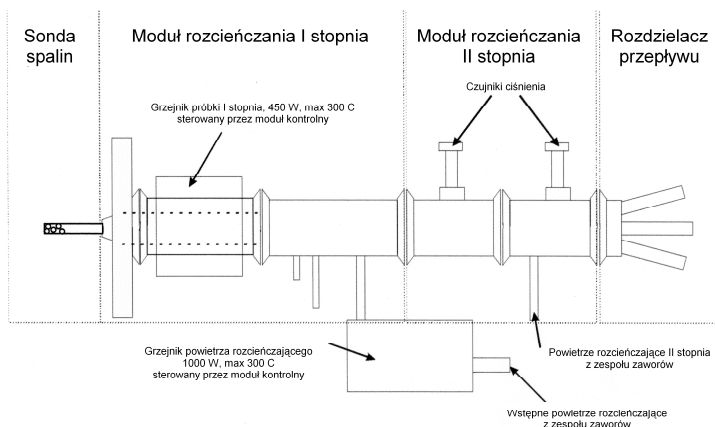
kę, w której występuje przepływ krytyczny stabilizujący strumień próbki. Istnieje możliwość zastosowania dwóch stopni rozcieńczenia spalin kondycjonowanym powietrzem. Sterowany komputerowo zestaw zaworów powietrza i grzejników elektrycznych jest odpowiedzialny za realizację różnych stopni rozcieńczenia spalin i utrzymanie parametrów badanej próbki, a szczególnie temperatury - maksymalnie 52<sup>0</sup>C, zgodnie z norma EPA. Schemat układu termicznej stabilizacji próbki spalin przedstawiono na rys. 2.4. Wstępne rozcieńczenie realizowane jest za pomocą powietrza zimnego, a drugi stopień rozcieńczenia opcjonalnie za pomocą powietrza podgrzanego. Wartość całkowitego stopnia rozcieńczenia jest iloczynem obu stopni cząstkowych. Przygotowana w powyższy sposób próbka gazów jest następnie zasysana do analizatora TEOM

Analizator TEOM wyposażony jest w system rejestracji danych, umożliwiający monitorowanie stanu poszczególnych komponentów układu pomiarowego oraz ciągły zapis mierzonych wielkości. Wybrane wielkości zarejestrowane podczas badań można następnie wykorzystać do wykonania wykresów i poddać analizie według odpowiedniego kryterium.

W celu dokonania pomiarów emisji cząstek stałych, należało przetransportować system pomiarowy na miejsce, gdzie przeprowadzany jest rozruch silnika GTD-350.



Rys. 2.3. Widok wnętrza otwartej obudowy przetwornika masy TEOM  
 Fig. 2.3. View of the interior of opened TEOM mass transducer



Rys. 2.4. Schemat układu termicznej stabilizacji próbki spalin w mini-tunelu rozcieńczającym (MDT)

Fig. 2.4. Diagram of thermal stabilization of exhaust gas specimen in the Mini Dilution Tunnel (MDT)

Szczególne trudności wykorzystania omawianego analizatora do przedstawianych badań polegała na tym, że jest on przewidziany do pracy w warunkach laboratoryjnych. Stąd wynikła konieczność opracowania metody transportu i zabezpieczenia odpowiednich warunków pracy urządzenia na miejscu pomiaru, tj. w warunkach polowych. Pomiar uzależniony był od warunków pogodowych i możliwości wykorzystania części lądowiska śmigłowcowego, udostępnianego chwilowo do badań silnikowych. Temperatura otoczenia ma zasadniczy wpływ na możliwość przeprowadzenia pomiarów ze względu na konieczność uzyskania, ustabilizowania i utrzymania odpowiedniej temperatury toru pomiarowego próbki spalin. Mimo, że analizator TEOM wyposażony jest w system stabilizacji temperatury w obszarze sensora masy filtra, to moc układu opcjonalnego podgrzewania powietrza w mini-tunelu rozcieńczającym nie jest przewidziana do pracy przy niskiej temperaturze otoczenia. Ogólny widok stanowiska badawczego wraz z aparaturą pomiarową przedstawiono na Rys. 2.5–2.6

### 3. Metodyka pomiaru emisji cząstek

Zgodnie z przyjętą w lotnictwie procedurą [2] [4], próba silnika turbospalinowego obejmuje następujące etapy:

I – automatyczne uruchomienie silnika, osiągnięcie prędkości obrotowej małego gazu, II – zakres małego gazu (MG), III – zakres przejściowy – do osiągnięcia zakresu LOT, IV – zakres LOT, V – przejście na zakres małego gazu, VI – zakres małego gazu (MG), VII – wybieg wirnika turbosprężarki.

Obciążenie silnika GTD-350 w stopniu umożliwiającym zrealizowanie pełnego zakresu LOT nie jest możliwe, ponieważ stanowisko pomiarowe nie jest jeszcze wyposażone w hamulec silnikowy. Odpowiednikiem stanu obciążenia LOT była podwyż-

szona prędkość obrotowa wirnika turbosprężarki (ok. 65%). Stany obciążenia silnika według procedury MG → LOT → MG (mały gaz → lot → mały gaz) zrealizowano z powyżej sformułowanym ograniczeniem. Schemat programu próby silnika GTD-350 przedstawiono na Rys. 3.1.

Pomiar emisji cząstek stałych w spalinach silnika turbiny GTD-350 został wykonany według następującej kolejności:

- ustawienie stanowiska silnikowego na lądowisku śmigłowcowym,



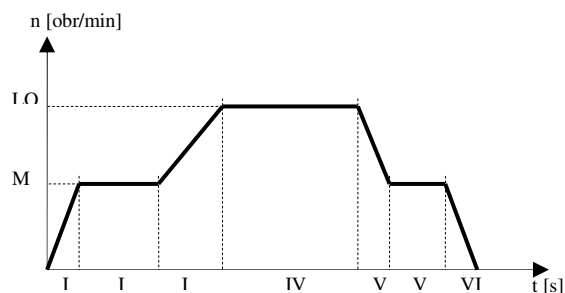
Rys. 2.5. Widok ogólny stanowiska pomiarowego z silnikiem GTD-350. Widoczny analizator Horiba TEOM 1105 oraz sprężarka powietrza zasilająca mini-tunel rozcieńczający (MDT)  
Fig. 2.5. Plan view of the measuring stand with GTD-350 engine. Visible: Horiba TEOM 1105 analyzer and the air compressor for feeding the Mini Dilution Tunnel (MDT)



Rys. 2.6. Silnik GTD-350 wraz z mini-tunelem rozcieńczającym; widoczna sonda spalin  
Fig. 2.6. GTD-350 engine with Mini Dilution Tunnel; visible the exhaust gas sampling probe

- montaż i podłączenie aparatury pomiarowej

- włączenie analizatora TEOM Horiba na czas stabilizacji termicznej (ok. 2 godz.),
- uruchomienie rejestracji danych pomiarowych,
- rozruch silnika GTD-350, a następnie zmiana obciążenia silnika według opisanej wyżej sekwencji,
- wyłączenie silnika i wybieg wirnika turbosprężarki aż do zatrzymania,
- zatrzymanie rejestracji danych.



Rys. 3.1. Program próby silnika GTD 350; MG – zakres małego gazu, LOT – zakres LOT [2]

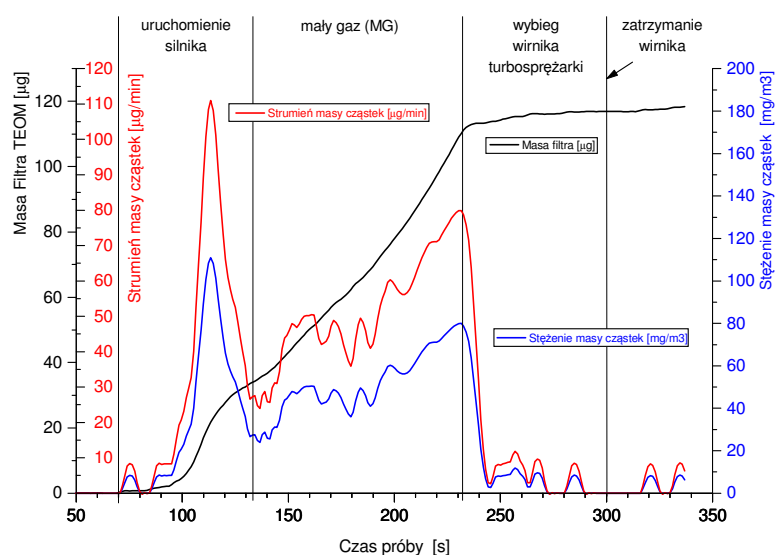
Fig. 3.1. Program of the GTD-350 engine test; MG – low range, LOT – flight range

## 4. Wyniki pomiarów

Do oceny wybrano przebiegi poniższych zmierzonych wielkości:

- masę filtra TEOM [ $\mu\text{g}$ ] - tzn. sumaryczną masę cząstek osadzonych na filtrze,
- strumień masy cząstek w spalinach [ $\mu\text{g}/\text{min}$ ],
- stężenie masy cząstek w spalinach [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ].

Po odpowiedniej konwersji, zebrane dane stały się podstawą wykonania wykresu przedstawionego na Rys. 4.1.



4.1. Silnik turbospalinowy GTD-350, przebieg zmian strumienia masy cząstek stałych zarejestrowany podczas testu

Fig. 4.1. GTD-350 turbine engine, run of particle matter mass changes recorded during test:

- particle matter mass flux [ $\mu\text{g}/\text{min}$ ],
- particle matter mass concentration [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ],
- TEOM filter mass [ $\mu\text{g}$ ]

Analizator TEOM współpracujący z tunelem rozcieńczającym umożliwia automatyczne przeliczenie zawartości cząstek w rozcieńczonym strumieniu spalin na wartości dotyczące spalin surowych. Z tego powodu wartości prezentowane na wykresie dotyczą stężenia i strumienia masy cząstek zawartych w spalinach bezpośrednio wpływających z rur wylotowych silnika.

Zastosowany analizator wykazał przydatność do badań emisji cząstek również w spalinach silnika turbospalinowego. Charakter przebiegów mierzonych wielkości odpowiada stanowi obciążenia silnika. Zwiększona dawka paliwa wtryskiwanego w fazie rozruchu powoduje zwiększoną emisję cząstek stałych, objawiającą się widocznym pikiem wartości stężenia tych cząstek na wykresie. W fazie ustabilizowanej pracy (MG) emisja cząstek stałych ulega niewielkim zmianom. W zakresie wyłączenia silnika i wybiegu wirnika turbosprężarki następuje stopniowe zmniejszanie się stężenia cząstek w rurze wylotowej aż do ich zaniku.

Należy zwrócić uwagę na etap ostatni testu, kiedy po zatrzymaniu wirnika kontynuowano pomiar. Zjawisko śladowego dymienia z układu wylotowego w tej fazie próby znalazło odbicie w zarejestrowanych niewielkich wartościach stężeń cząstek w pobranej próbce spalin.

## 5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów można stwierdzić, że:

- Stężenie cząstek stałych w spalinach silnika turbospalinowego umożliwia zastosowanie analizatora typu Horiba TEOM, tzn. mieści się w zakresie pomiarowym. Jest to jednak poziom bliski rozdzielczości przyrządu, dlatego należy

uwzględnić zalecenie stosowania możliwie małego (o wartości znacznie mniejszej od 10) stopnia rozcieńczenia spalin w mini-tunelu rozcieńczającym (MDT).

- Stosowanie stopnia rozcieńczenia o wartości około 8–10, typowego dla procedury badania silników tłokowych nie odpowiada specyfice pracy i emisji spalin silnika przepływowego (turbospalinowego), w którym z zasady w rurze wylotowej następuje znaczne rozcieńczenie spalin powietrzem wtórnym, w stopniu porównywalnym z wartościami przyjętymi w metodzie CVS. Stąd ponowne rozcieńczenie spalin w mini-tunelu prowadzi do znikomego stężenia czą-

- 
- stek stałych w próbce pobieranej do analizatora.
- Uzyskanie większych stężeń cząstek w rozcieńczonej próbce wprowadzanej do analizatora TEOM może wymagać innej konfiguracji aparatury badawczej, łącznie z opracowaniem nowego układu zaworów pneumatycznych i zmianą oprogramowania analizatora, co w chwili obec-

nej nie jest możliwe. W tej sytuacji, wydaje się, że doraźnego rozwiązania problemu należałoby poszukiwać w opracowaniu innej procedury pomiarowej.

---

### *Literatura*

[1] Golomb P.: New Method for Particulate Matter Measurement with TEOM Diesel Particulate Mass Monitor. PTNSS Congress Proceedings, Cracow, 2007.

[2] Magier J.: "The estimation of technical state of helicopter turbine engine bearing system", PTNSS Congress, Cracow 2007,

[3] Dutcza J.: "Application Of The TEOM Analyser To SI Engine Particulates Emissions Measurement", International Congress Motor Vehicles & Motors 2008, Kragujevac 08-10.10.2008.

[4] Dutcza 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: Powertrain, Design, Ecology & Diagnostics, PTNSS June 2009.

[5] Dutcza J.: "Preliminary Investigations Of Chemical Composition Of Helicopter Turbine Engine Exhaust Gases", International Congress Motor Vehicles & Motors 2010, Kragujevac 2010.

---

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

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

