

Nowa metoda pomiaru emisji cząstek stałych w spalinach silnika z zapłonem samoczynnym za pomocą metody TEOM

W artykule zwrócono uwagę, że największa liczba cząstek stałych występujących w spalinach silnikowych nie przekracza średnicy 0,1 μm . W celu dokładnego określenia rozkładu średnic cząstek stałych firma Horiba zaproponowała metodę typu grawimetrycznego o nazwie TEOM, w której stosuje się zestaw filtrów o różnej przepustowości. Masa osadzonych na filtrach cząstek wyznaczana jest w oparciu o analizę częstotliwości drgań filtrów. Przedstawiona metoda pozwala na pomiary masy cząstek stałych z dokładnością od 0,01 mg do kilku gramów.

Słowa kluczowe: cząstki stałe, metoda grawimetryczna

New method for particulate matter measurement with TEOM diesel particulate mass monitor

In the paper the Author pointed out, that the major number of the Particulate Matter in the exhaust gas of engines riches the sizes of less than 0.1 μm . For the better determination of the PM diameter distribution the Horiba enterprise has proposed new metering method of the gravimetric type named TEOM. In the metering system a set of filters with different flow capacity has been applied. The mass of Particulate Matter hold-up on every filter is being determined by the analysis of the filter vibration frequency. The presented method allows the measurements of the PM-mass with the accuracy of 0.01 mg up to few grams.

Key words: particulate matter; gravimetric method

Wprowadzenie

Obecnie problem pomiaru wielkości cząstek stałych jest tematem bardzo aktualnym. Przepisy dotyczące ochrony środowiska są stale zaostrzane, a producenci samochodów próbują spełnić te wymagania przez uzyskanie coraz mniejszych wartości emisji tlenków azotu, węglowodorów, tlenku i dwutlenku węgla i – wkrótce – również cząstek stałych.

Węglowe cząstki stałe pochodzą z różnych źródeł, ale pojazdy silnikowe są traktowane powszechnie jako główne źródło ich emisji. Z tego względu zalecane jest dokładniejsze badanie cząstek stałych emitowanych z pojazdów. W ciągu kilku ostatnich lat producenci silników z zapłonem samoczynnym prowadzili szereg badań dotyczących emisji cząstek stałych. Nie prowadzono natomiast dokładnej analizy dotyczącej rozkładu wielkości tych cząstek.

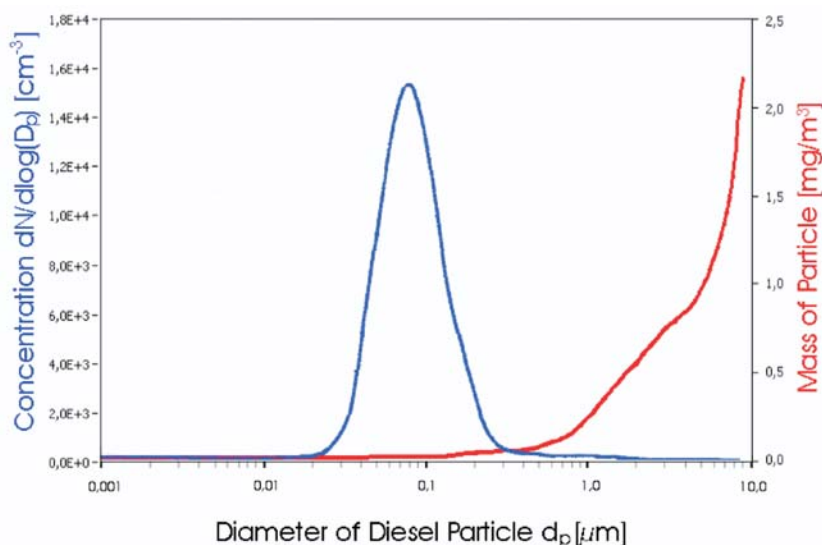
Metoda badawcza

Dla dokładniejszej analizy konieczny jest pomiar wielkości cząstek stałych emitowanych w spalinach silnika z zapłonem samoczynnym. W tym celu proponuje się zastosowanie metody o nazwie TEOM (*Tapered Element Oscillating Microbalance*). Urządzenie takie, stanowiące rodzaj mikrowagi oscylacyjnej, produkowane przez firmę Rupperecht & Patashnick Co. Inc. (USA) jest oferowane na rynku europejskim przez firmę HORIBA Europe GmbH.

Introduction

Nowadays, diesel particulate matter is a very prevailing topic. Environmental protection laws are permanently tightened, and automobile manufacturers try to comply with the laws by using increasingly smaller limit values for nitro oxides, hydrocarbons, carbon monoxides and dioxides – and soon also for carbon-particulate matter.

Carbon-particulate matter is produced by different sources, but mostly motorcars are regarded as the scapegoat by the media. Therefore a more exact examination of the



Rys. 1. Typowy rozkład cząstek stałych dla silników z zapłonem samoczynnym

Fig. 1. A typical particle distribution for diesel engine

Urządzenie o nazwie TEOM 1105 stwarza możliwość ciągłego pomiaru wielkości związanych z emisją cząstek stałych w spalinach silnika ZS. Mierzonymi wielkościami są: całkowita rzeczywista masa cząstek (μg), stężenie cząstek (mg/m^3) i strumień cząstek (emisja) (mg/h). Przyrząd pomiarowy wykorzystuje spaliny rozcieńczone.

System ten nie wykonuje bezpośrednio pomiaru średnicy i masy cząstek; pomiar polega na zliczaniu masy cząstek określonej wielkości w założonym przedziale czasu. W metodzie TEOM stosowany jest zestaw filtrów o różnej przepustowości. Przepuszczając spaliny przez tzw. filtr precyzyjny można zmierzyć masę tylko najmniejszych cząstek, które nie zostały zatrzymane przez ten filtr. Filtr określany jako „średni” pozwala odpowiednio na sumaryczny pomiar masy małych i średnich cząstek. Wyznaczenie masy cząstek średniej wielkości polega na odjęciu masy cząstek najmniejszych od sumy mas cząstek najmniejszych i średnich. W ten sam sposób wyznaczana jest masa cząstek dużych i największych. Za pomocą większego zestawu filtrów o wąskim zakresie wymiarów filtrowanych cząstek można precyzyjnie wyznaczyć rozkład wielkości cząstek w emitowanych przez silnik gazach wylotowych.

Zasada pomiaru

Zasada pomiaru urządzeniem TEOM oparta jest na metodzie grawimetrycznej. Rozcieńczone spaliny przechodzą przy stałym natężeniu przepływu przez wkład filtracyjny urządzenia, przy czym w sposób ciągły jest mierzona masa wkładu (dm/dt). Bezpośrednio przed właściwym pomiarem urządzenie jest kalibrowane przez zmierzenie masy czystego filtra. Różnica między aktualną masą filtra a masą filtra czystego jest wartością masy osadzonych cząstek stałych. Dynamiczna rozdzielczość stosowana w celu wyznaczenia wartości dm/dt może być ustawiana indywidualnie w przedziale czasu 0,2–10 s. Przy wzroście temperatury spalin do wartości 40–60°C, automatycznie wprowadzana jest korekta związana ze zmianą wilgotności powietrza, a pobierana próbka spalin kierowana jest do czujnika masy. Spaliny przepływają do czujnika masy przez filtr TEOM wykonany ze specjalnego rodzaju szkła, pokrytego teflonem typu Pallflex TX40.

Zasada pomiaru masy cząstek wykorzystana w czujniku masy TEOM jest podobna do wagi laboratoryjnej, gdzie oznaczona przez czujnik masa jest wynikiem pomiaru zmiany fizycznego parametru (w tym przypadku częstotliwości).

Na rysunku 2 przedstawiono schemat konstrukcji systemu pomiarowego TEOM. Główny element systemu pomiarowego, zwany *Tapered Element* (TE), ma postać pustej rurki umocowanej jednym końcem, natomiast drugi jej koniec ma możliwość swobodnego ruchu. Ponad utwierdzonym końcem rurki znajduje się wymienny wkład filtracyjny *Exchangable TEOM Fiber Cartridge*. Mierzona próbka spalin przepływa przez filtr, a następnie przez opisaną rurkę (TE).

Regulator przepływu (*Mass Flow Controller*, rys. 2) zlokalizowany w torze pomiarowym zapewnia stałą wartość natężenia przepływu przez system TEOM. Rurka (TE) drga z częstotliwością rezonansową a obwód elektroniczny

emitted carbon-particulate matter is strongly recommended. Engine manufacturers have already examined the set of emitted carbon-particulate matter in diesel engines for years. However, there are hardly any examinations which describe the distribution of the particles by their size.

The diagram in Fig. 1 shows the typical distribution of particle sizes in diesel internal combustion engines. The blue curve shows the number of occurring particles in dependence of their size, whereas the red curve shows their mass in dependence of the size. As expected the weight of the particles increases with the size of the particle, but this behaviour is non-linear. However, it also turns out that the greatest concentration is not in the area of the large, visible particles, but rather in the area of the small particles with a size of about 0.1 μm . Only a tiny amount of the complete particle emission of a motorcar consists of large, visible particles which are the black cloud of smoke from diesel engines.

Examination Method

A TEOM (*Tapered Element Oscillating Microbalance*) sold in Europe by HORIBA Europe GmbH shall be used for more exact examination of the diesel particulate matter. The device manufacturer is Rupprecht & Patashnick Co. Inc. in the USA.

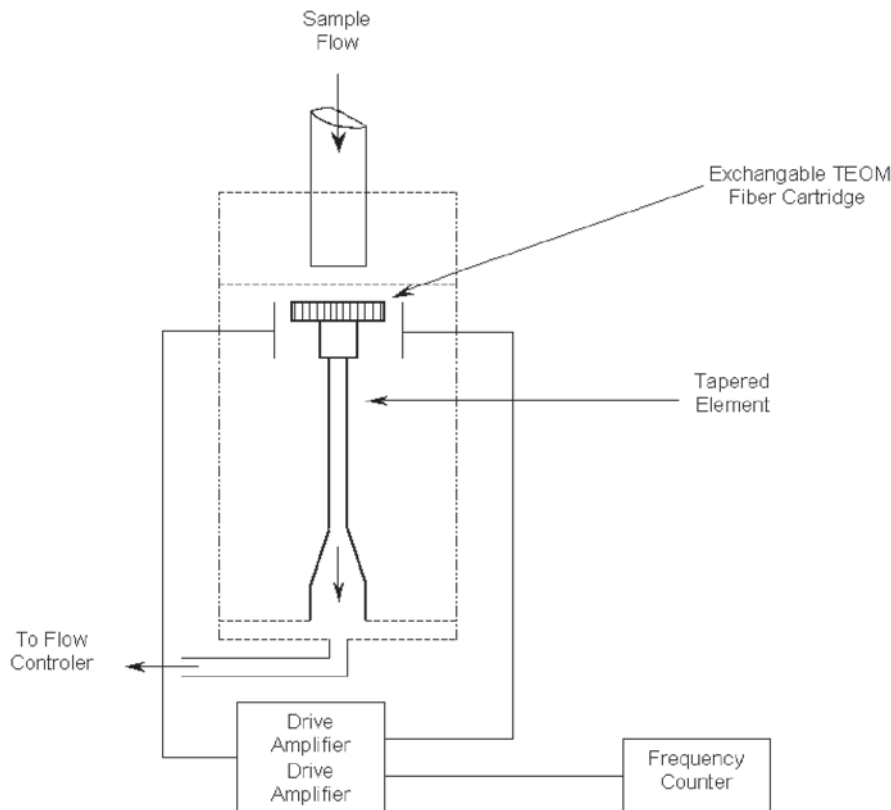
The TEOM Series 1105 device is a Diesel Particulate Mass Monitor which is used for the continuous particle concentration measuring of the in the exhaust gas of an internal combustion engine. This device can measure the complete actual mass of the particles (μg), the concentration (mg/m^3) and the particle flow (mg/hr) in the exhaust gas. Only diluted exhaust gas will pass the gauge.

Primarily, this device is not able to distinguish the particles by size or weight. It only measures the weight of the soot particles in a defined time window. The gauge must be modified and different filters pre-assembled to let particles of different sizes pass the filters and measure them in the TEOM. Using a fine filter, only the smallest-sized particles can pass and thus their mass determined by the gauge. Using a medium-sized filter, the smallest-sized and medium-sized particles can pass and thus their mass be measured. To determine the mass of the medium-sized particles the mass of the smallest-sized particles is removed from the current total mass of the previous measuring. In the same way, the large particles mass is determined. This is realized also in this form for great particles. By using a greater range of at different filters, the particle distribution can be examined and classified even better in dependence of the particle sizes.

Measuring Principle

The measuring method of the TEOMs is based on the gravimetric measuring principle. The *diluted* exhaust gas passes through a TEOM filter cartridge in compliance with a constant flow rate and the weight of the cartridge is continuously measured (dm/dt). Shortly before the real measuring the actual non-loaded weight of the cartridge is measured and thus calibrated. The difference between the weights of the particle-loaded cartridge and the non-loaded cartridge is the current value of the particulate mass in the filter. The dynamic resolution to determine the current value dm/dt can be

zawierający wzmacniacz drgań (*Drive Amplifier*) i licznik częstotliwości (*Frequency Counter*, rys. 2) podtrzymuje drgania dostarczając energię do układu. Częstotliwość rezonansowa zmienia się wraz ze zmianą masy drgającego elementu. Im więcej cząstek znajduje się w rurce, tym bardziej zmniejsza się wartość częstotliwości rezonansowej.



Rys. 2. Schemat funkcjonalny TEOM
Fig. 2. TEOM Functional Diagram

Zmiana częstotliwości jest przeliczana przez inny obwód elektroniczny zgodnie z zależnością:

$$f = (K/m)^{0,5} \quad (1)$$

gdzie: f – częstotliwość [rad/s], K – stała urządzenia zależna od częstotliwości drgań, m – masa [g].

Przez przekształcenie równania można uzyskać chwilową wartość mierzonej masy:

$$dm = K_0 \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_0^2} \right) \quad (2)$$

gdzie: dm – zmiana masy [g], K_0 – stała źródła drgań, f_0 – częstotliwość początkowa [Hz], f_1 – częstotliwość końcowa [Hz].

Stała K_0 (stała źródła drgań) wykorzystywana do kalibracji przyrządu może być łatwo wyznaczona przez pomiar częstotliwości rezonansowej dla znanej przepływającej masy i bez przepływu.

Kompletny układ pomiarowy wraz z wewnętrznymi elementami TEOM przedstawiono na rys. 3.

Rozcieńczona próbka spalin (*Sample Flow*, rys. 3) jest wysysana z tunelu rozcieńczającego (*Dilution Tunnel*) i

adjusted individually from 0.2–10 seconds. If the exhaust gas temperature is increased to 40–60 degrees Celsius, falsifications during the measuring caused by atmospheric humidity difference are reduced. The heated sample flow reaches the heated pipe to the mass transducer. The exhaust gas is passed to the mass transducer through the TEOM filter which is made of Teflon-coated borosilicate glass (Pallflex TX40 material).

The weighing principle used in the TEOM mass transducer is similar to that of a laboratory microbalance where the sensor-detected mass is the result of the measurement of a parameter change (in this case frequency) that is directly coupled via a physical law.

The Tapered Element is the heart of the TEOM. In illustration 2 it is shown as schematic construction of the TEOM. The Tapered Element is an empty pipe which is fastened at one end and swings freely at the other end. An interchangeable filter cartridge is above the fastened end. The sample flow to be measured passes the filter and then the tapered element.

A mass flow controller located behind the heart of the gauge ensures a constant flow rate through the TEOM. The Tapered Element oscillates in its resonant frequency. An electronic circuit maintains the oscillation by adding energy to balance the material losses. Electronic

circuit gains the oscillation by add of energy to balance the losses of the material. The resonant frequency changes with the change in the mass of the element. The more particles are in the pipe, the more the resonant frequency declines. This change is included and issued in the form of mass after a conversion by another electronic circuit (eq. 1) where: f – frequency [rad/s], K – spring constant, m – mass [g].

By rearranging the equation you can solve it for a real time value of mass (eq. 2) where: dm – change in mass [g], K_0 – spring constant, f_0 – initial frequency [Hz], f_1 – final frequency [Hz].

Thus, K_0 (the calibration constant for the instrument) can be easily determined by measuring the frequencies with and without a known mass.

The complete measuring setup is shown together with the internal elements of the TEOM in illustration 3.

The diluted exhaust gas is vacuumed from the tunnel and passed through the primary filter. The mass of the particles is then determined in the TEOM. The exhaust gas is led through another filter before it passes the Manifold and the

przepływa przez filtr wstępny (*Particle Size Filter*). Masa cząstek jest wyznaczana w zestawie filtrów (*TEOM Filter Cartridge*). Spaliny są następnie prowadzone przez kolejny filtr (*Inline Filter*) zanim dostaną się do kolektora (*Manifold*) i regulatora przepływu (*Mass Flow Controller*). Urządzeniem powodującym przepływ spalin przez przyrząd pomiarowy jest pompa podciśnieniowa (*Sample Pump*).

Dane techniczne

Przedstawione urządzenie wykorzystujące opisaną metodę pomiarową jest pomocne w klasyfikacji wielkości cząstek stałych emitowanych w spalinach silnika ZS. Możliwy jest ciągły pomiar masy, stężenia i strumienia dla dowolnie określonego zakresu wielkości cząstek. Podstawowe dane techniczne są następujące:

| | |
|--------------------------------|---|
| Natężenie przepływu: | 0,5–5 dm ³ /min |
| Temperatura próbki na filtrze: | max 60°C, (nom. 47°C) |
| Mierzalne stężenia: | 0,1 mg/m ³ do kilku g/m ³ |
| Masa cząstek: | 0,01 mg do kilku gram |

System TEOM umożliwia badania zależności wielkości cząstek stałych emitowanych przez silnik ZS od sposobu jego eksploatacji. Pozwala on na rozpoznanie obszarów eksploatacji silnika, w których silnik ZS emituje najwięcej cząstek stałych, a także na analizę rozkładu wielkości cząstek. Taka analiza emisji cząstek stałych może być przeprowadzona na silnikowym stanowisku hamownianym, zgodnie z wcześniej opracowaną procedurą badawczą. Otrzymane wyniki pomiarów rozkładu wielkości cząstek w wybranych punktach pracy silnika mogą stanowić podstawę do określenia rozkładu dla całego obszaru pracy silnika. W tym celu przewiduje się opracowanie specjalnego oprogramowania, które korzystając z metody ekstrapolacji wyników uzyskanych z systemu TEOM, pozwoli na badanie obszarów pomiędzy wybranymi punktami pracy silnika. Uzyskane wyniki powinny umożliwić producentom silników optymalizację ich pracy w zdefiniowanych obszarach w celu zmniejszenia całkowitej emisji cząstek stałych.

(*Thum. M. Brzeżański*)

Dipl.-Ing. Peter Golomb – System Engineering,
HORIBA Europe Automation Division GmbH.

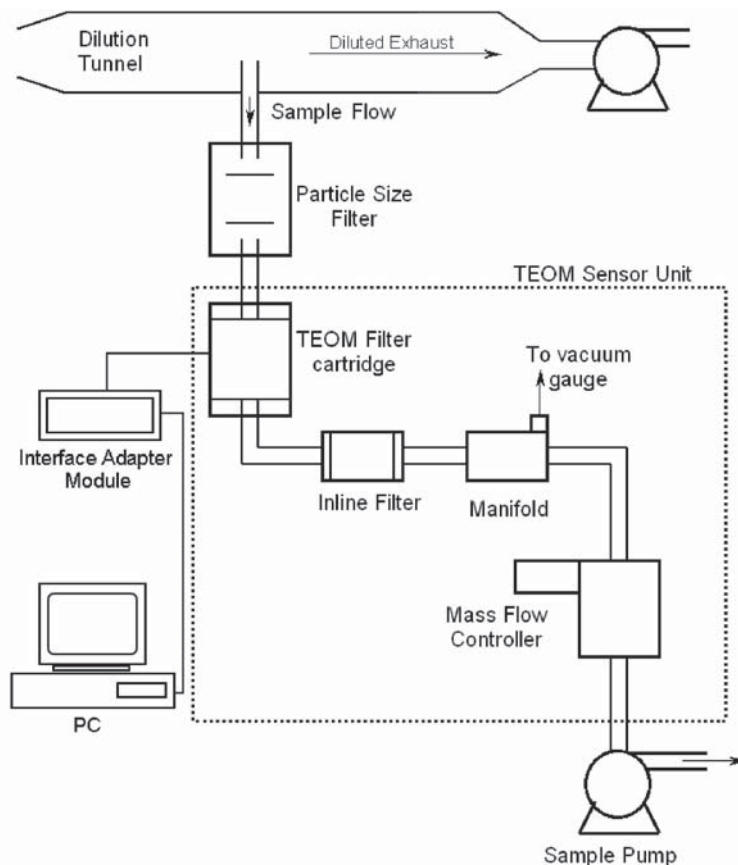
Dipl.-Ing. Peter Golomb – System Engineering,
HORIBA Europe Automation Division GmbH.



Mass Flow Controller. The Sample Pump creates a negative pressure and sucks the exhaust gas through the gauge.

Technical data

The complete setup together with the measuring method helps in the classification of the diesel particulate matter



Rys. 3. Układ pomiarowy

Fig. 3. Measuring setup

under the main criterion to determine its size. With this arrangement it is possible to measure the mass, concentration and flow of the particles for freely definable particle sizes continuously. The basic technical data are as follows:

| | |
|---------------------------|---|
| Flow rate: | 0.5–5 dm ³ /min |
| Temperature at filter: | max 60°C (default 47°C) |
| Measurable concentration: | 0.1 mg/m ³ to several g/m ³ |
| Particulate weight | 0.01 mg to several g |

The dependence of the particle size on the way of driving shall be examined. The point is to find out when a diesel engine produces most carbon-particulate matter, at which operating points, and – particularly – how the size distribution looks like in doing so. All those checks will be done at a diesel engine test bench. At this test bench, measurements at previously defined operating points will be carried out. Special software will extrapolate the non-examined areas between the individual operating points where the measurements were carried out. The measurement results shall enable the engine manufacturers to work at these specific operating points or areas and to optimize them to reduce the total particulate matter emissions.