

The analysis of the methods of hydrocarbon emission measurement according to European vehicle emission legislation

The paper discusses the measurement methods of methane hydrocarbons, non-methane hydrocarbons and total hydrocarbons set forth in the European emission regulations pertaining to M and N vehicle types and their engines. A model for the determining of the concentration of the said hydrocarbons and mathematical formulas have been derived. The concentration of the hydrocarbons determined as per the standards and the actual hydrocarbon concentration have been compared. Based on the above, changes have been proposed in the methodology set forth in the regulations.

Key words: combustion engines, ecology, hydrocarbon emissions

Analiza metod pomiaru emisji węglowodorów według przepisów europejskich dotyczących emisji zanieczyszczeń z pojazdów

W artykule omówiono metody pomiaru metanu, węglowodorów niemetanowych i węglowodorów całkowitych ustalone w przepisach europejskich dotyczących emisji zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych kategorii homologacyjnych M i N oraz ich silników. Przedstawiono model do określenia stężenia wymienionych węglowodorów i wyprowadzono wzory obliczeniowe. Porównano stężenie węglowodorów określone według metod podanych w przepisach ze stężeniem rzeczywistym. Na tej podstawie zaproponowano zmiany w metodach określonych w przepisach.

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, ekologia, pomiar węglowodorów

1. Introduction

The first European light duty vehicle emissions regulations (passenger vehicles and light duty vans) tested on a chassis dynamometer that came into force in the beginning of the 1970's of the XX century – rule 15 ECE UN [1] and directive 70/220/EEC [2] – determine the requirements as to the emission of hydrocarbons. The requirements as to the emissions of these compounds were also set forth in the first emission regulations pertaining to heavy duty vehicles (trucks, special vehicles and buses) hereinafter called heavy duty vehicles, tested on chassis dynamometers – in regulation 49 [3] and directive 88/77/EEC [4] – introduced in the 1980's of the XX century.

The term hydrocarbons in these regulations denoted all hydrocarbons including other organic compounds detected by the exhaust gas analyzers used for the measurement of concentration of these substances (initially non-dispersive, operating in the infrared range NDIR and from the beginning of the 1980's flame ionization FID analyzers). The hydrocarbons were marked HC in the regulations.

At the end of the 1990's of the XX century the European regulations divided the hydrocarbons into three types:

- methane CH₄
- non-methane hydrocarbons NMHC
- total hydrocarbons THC.

Such a division was first introduced in the directive 1999/96/WE [5] determining the set of requirements for the heavy duty vehicle emissions popularly referred to as Euro III, Euro IV, Euro V and EEV. These requirements pertain to the above mentioned three types of hydrocarbons. In the

1. Wprowadzenie

Pierwsze europejskie przepisy dotyczące emisji zanieczyszczeń z pojazdów lekkich (samochodów osobowych i dostawczych) badanych na hamowni podwoziowej, które weszły w życie na początku lat siedemdziesiątych XX w. – regulamin 15 EKG ONZ [1] i dyrektywa 70/220/EWG [2] – ustalały wymagania m.in. odnośnie do emisji węglowodorów. Wymagania odnośnie do emisji tych związków ustalono także w pierwszych przepisach o emisji zanieczyszczeń z silników pojazdów ciężkich (samochodów ciężarowych, samochodów specjalnych i autobusów), zwanych dalej w skrócie „pojazdami ciężkimi”, badanych na silnikowych stanowiskach dynamometrycznych – w regulaminie 49 [3] i dyrektywie 88/77/EWG [4] – wprowadzonych w latach osiemdziesiątych XX w.

Po pojęciem „węglowodory” (*hydrocarbons*) rozumiano w tych przepisach wszystkie węglowodory, a także inne związki organiczne, na których zawartość w spalinach reagowały analizatory stosowane do pomiaru stężenia, początkowo niedyspersyjne, pracujące w zakresie promieniowania podczerwonego (NDIR), a od początku lat osiemdziesiątych płomieniowo-jonizacyjne (FID). Węglowodory w przepisach oznaczono skrótem HC.

Pod koniec lat dziewięćdziesiątych XX w. zaczęto w Europie wprowadzać w przepisach podział węglowodorów na trzy rodzaje:

- metan CH₄
- węglowodory niemetanowe NMHC
- węglowodory całkowite THC.

Taki podział wprowadzono po raz pierwszy w dyrektywie 1999/96/WE [5], ustalającej pakiet wymagań odnośnie do

case of methane they must be met only by the SI engines fuelled with natural gas and in the case of THC only by the CI engine vehicles. In the beginning of our decade identical standards were introduced in regulation 49, series 03 and 04 of the amendments [6].

In the case of light duty vehicles the division of hydrocarbons into three types is not binding (as at 31.12.2008). It was introduced in the new UE legislation: rule 715/2007 [7] and 692/2008 [8] which for the homologation of new types of vehicles (NTA), will become binding in 2009 and for all light duty vehicles (ANR) in 2011. Respective regulations adapted to those in the UE rules are currently being introduced in regulation 83 ECE UN as series 06 of the amendments.

The reason for the introduction of the division of the hydrocarbons into three types is mostly the fact that the regulations initially applied only to the vehicles fuelled with conventional fuels: gasoline and diesel oil are gradually extended on vehicles fuelled with alternative fuels including natural gas and bio-methane. These vehicles are characterized by a low NO_x emission and a very low emission of PM as well as some non-controlled emissions such as benzene and PAH. To that end, for ecological reasons their application is desirable. At the same time the emission of methane is very high—reaches up to 80% of the total hydrocarbons while for the vehicles fuelled with gasoline and diesel oil its share is usually lower than 10%.

Methane, similarly to carbon dioxide is a greenhouse gas. The impact of an individual gas on the climate change is assumed as an equivalent of CO_2 for a 100 year old global greenhouse potential. For methane it is 21–26 times higher than for carbon dioxide [9, 10]. A high value of this equivalent (high emission of methane) leads to a situation where the equivalent gas emission from SI engines fuelled with natural gas and bio-methane may be higher than from those fuelled with gasoline even though the emission of carbon dioxide is much lower due to a lower carbon content in these fuels.

A majority of catalytic converters currently applied is characterized by a low methane oxidation level [11]. Thanks to extensive R&D works these flaws have been eliminated but an average level of conversion has not yet been reached at similar production costs. A high methane content and its low conversion level cause the emission of THC from an SI engine fuelled with NG or bio-methane to be much higher than it is in the case of an engine fuelled with gasoline or LPG. Hence, if we limit the emission of THC only, then the admissible value for this pollutant must be obtainable when fuelled with NG or bio-methane. Otherwise a barrier against such vehicles will come up. At the same time such an admissible value will be too high for a vehicle engine fuelled with gasoline or LPG. This problem has been solved in different ways for LDV tested for emissions on the chassis dynamometer and HDV whose engines were tested on the engine test bed.

For LDV with SI engines the new EU legislation set forth the requirements for total and non-methane hydrocarbons (Fig. 1) and for the determining of the emission of the latter a measurement of the methane concentration in the exhaust

emisji zanieczyszczeń z silników pojazdów ciężkich, nazywanych popularnie Euro III, Euro IV, Euro V i EEV. Wymagania te dotyczą wymienionych trzech rodzajów węglowodorów, przy czym w przypadku metanu muszą być spełniane tylko przez pojazdy z silnikami o ZI zasilane gazem ziemnym, a w przypadku THC tylko przez pojazdy z silnikami o ZS. Na początku obecnej dekady identyczne przepisy wprowadzono w regulaminie 49, seria 03 i 04 poprawek [6].

W przypadku pojazdów lekkich podział węglowodorów na trzy rodzaje dotychczas (według stanu na 31.12.2008 r.) nie obowiązywał. Wprowadzono go w nowych przepisach UE: rozporządzeniach 715/2007 [7] i 692/2008 [8], które dla homologacji nowych typów pojazdów (NTA) zaczęły obowiązywać w 2009 r., a dla wszystkich pojazdów lekkich (ANR) w 2011 r. Odpowiednie przepisy zharmonizowane z ustalonymi w wymienionych rozporządzeniach UE są obecnie wprowadzane w regulaminie 83 EKG ONZ jako seria 06 poprawek.

Wprowadzenie podziału węglowodorów na trzy rodzaje jest spowodowane w dużej mierze tym, że przepisy, które początkowo stosowano tylko do pojazdów zasilanych paliwami konwencjonalnymi: benzyną i olejem napędowym, są stopniowo rozszerzane na pojazdy zasilane paliwami alternatywnymi, w tym gazem ziemnym i biometanem. Pojazdy te charakteryzują się niską emisją tlenków azotu i bardzo niską zawartością stałych, a także części zanieczyszczeń niekontrolowanych, np. benzenu oraz PAH. W związku z tym, ze względów ekologicznych, jest pożądane ich szerokie stosowanie. Jednocześnie jednak emisja metanu jest bardzo wysoka – stanowi około 80% węglowodorów całkowitych, podczas gdy w przypadku pojazdów zasilanych benzyną i olejem napędowym jego udział jest na ogół mniejszy niż 10%.

Metan, podobnie jak dwutlenek węgla, jest zaliczany do gazów cieplarnianych. Wpływ poszczególnych gazów na zmianę klimatu przyjęto wyrażać jako ekwiwalent CO_2 dla 100-letniego potencjału globalnego ocieplania. Dla metanu jest on 21–26 razy większy niż dla dwutlenku węgla [9, 10]. Duża wartość tego ekwiwalentu powoduje, że w sytuacji znacznej emisji metanu ekwiwalentna emisja gazów cieplarnianych z pojazdów z silnikami o ZI zasilanych NG i biometanem może być większa niż z zasilanych benzyną, mimo że emisja dwutlenku węgla jest znacznie mniejsza ze względu na mniejszą zawartość węgla w tych paliwach gazowych.

Przeważająca część reaktorów katalitycznych stosowanych dotychczas w pojazdach cechuje się niskim stopniem utleniania metanu [11]. W wyniku intensywnych prac ten niedostatek częściowo usunięto, jednak nie udało się dotychczas uzyskać stopnia konwersji podobnego do średniego dla węglowodorów całkowitych przy zbliżonych kosztach produkcji. Duża zawartość metanu i niski stopień jego konwersji powodują, że emisja THC z pojazdów z silnikami o ZI zasilanych NG lub biometanem jest często znacznie większa niż zasilanych benzyną lub LPG. W związku z tym, jeśli się ogranicza tylko emisję THC, to wartość dopuszczalna dla tego zanieczyszczenia musi być możliwa do osiągnięcia przy zasilaniu NG lub biometanem. W przeciwnym razie stworzona będzie bariera stosowania takich pojazdów. Jednocześnie

gases is necessary. The introduction of the admissible values for both pollutants i.e. THC and NMHC is a compromise. In such a case, for vehicles fuelled with gasoline and LPG, NMHC are decisive for meeting the requirements as the admissible values for this pollutant are by approximately 32% lower than for THC while the share of methane in the latter amounts to approximately 10%. For vehicles fuelled with NG and bio-methane the meeting of the requirements will depend on the emission of THC. As for the hydrocarbons the requirements of Euro V and Euro VI are identical.

According to current legislation for HDV – directive 2005/55/WE [12] and regulation 49, series 04 of the amendments – engines are subject to tests for controlled emissions including hydrocarbons. There are two tests: steady state ESC and transient ETC. CI engines must meet the requirements as regards THC in the ESC test and NMHC in the transient test. SI engines fuelled with natural gas are not tested in the ESC test. In the ETC test they must meet the requirements as regards the emission of methane and NMHC (Fig. 1).

The emissions expressed in g/km for light duty vehicles and g/kW·h for engines of heavy duty vehicles are directly proportional to their concentration in the exhaust gases and the density, volume or the flow intensity of the exhaust gases and inversely proportional to the vehicle mileage or engine power. The further analysis pertains to the concentration and density which are parameters specific for individual pollutants including individual hydrocarbons.

2. Hydrocarbon concentration in the exhaust gases

The principle of the measurement of hydrocarbons concentration while they are divided into three types is identical for light duty vehicles and heavy duty vehicles. The exhaust sample is analyzed twice. The first analysis is done through the FID analyzer in the same manner as it is in the case of HC measurement before the division was introduced. The second analysis is also done through the FID analyzer but the sample is devoid of the non-methane hydrocarbons. The concentration of methane, non-methane hydrocarbons and total hydrocarbons is determined through the results of these two analyses.

A device named cutter is used for the removal of the non-methane hydrocarbons from the sample before

jednak tak ustalona wartość dopuszczalna będzie zbyt duża dla pojazdów zasilanych benzyną lub LPG. Problem ten rozwiązano w różny sposób dla pojazdów lekkich, badanych pod względem emisji zanieczyszczeń na hamowni podwozowej oraz pojazdów ciężkich, których silniki są badane na silnikowym stanowisku dynamometrycznym.

Dla pojazdów lekkich z silnikami o ZI nowe przepisy UE ustalają wymagania odnośnie do emisji węglowodorów całkowitych i niemetaanowych (rys. 1), przy czym do określenia emisji tych drugich niezbędny jest pomiar stężenia metanu w spalinach. Wprowadzenie wartości dopuszczalnych dla obu zanieczyszczeń, tzn. THC i NMHC, stanowi rozwiązanie kompromisowe. W takim przypadku dla samochodów zasilanych benzyną i LPG decydujące znaczenie dla spełnienia wymagań mają NMHC, gdyż wartości dopuszczalne dla tego zanieczyszczenia są o około 32% mniejsze niż dla THC, podczas gdy udział metanu w tych ostatnich wynosi około 10%. Natomiast dla pojazdów zasilanych NG i bio-metanem spełnienie wymagań będzie uzależnione od emisji THC. Odnośnie do emisji węglowodorów wymagania Euro V i Euro VI są identyczne.

Zgodnie z aktualnymi przepisami dla pojazdów ciężkich – dyrektywą 2005/55/WE [12] i regulaminem 49, seria 04 poprawek – badaniom pod względem emisji zanieczyszczeń kontrolowanych, w tym węglowodorów, podlegają silniki. Obowiązują dwa testy emisji: stacjonarny ESC i dynamiczny ETC. Silniki o ZS muszą spełnić wymagania odnośnie do emisji THC w teście stacjonarnym i NMHC w teście dynamicznym. Silniki o ZI zasilane gazem ziemnym nie są badane w teście stacjonarnym. W teście ETC muszą one spełniać wymagania odnośnie do emisji metanu i NMHC (rys. 1).

Emisja zanieczyszczeń wyrażona w g/km dla pojazdów lekkich i g/kW·h dla silników pojazdów ciężkich jest wprost proporcjonalna do ich stężenia w spalinach i gęstości oraz objętości lub natężenia przepływu spalin oraz odwrotnie

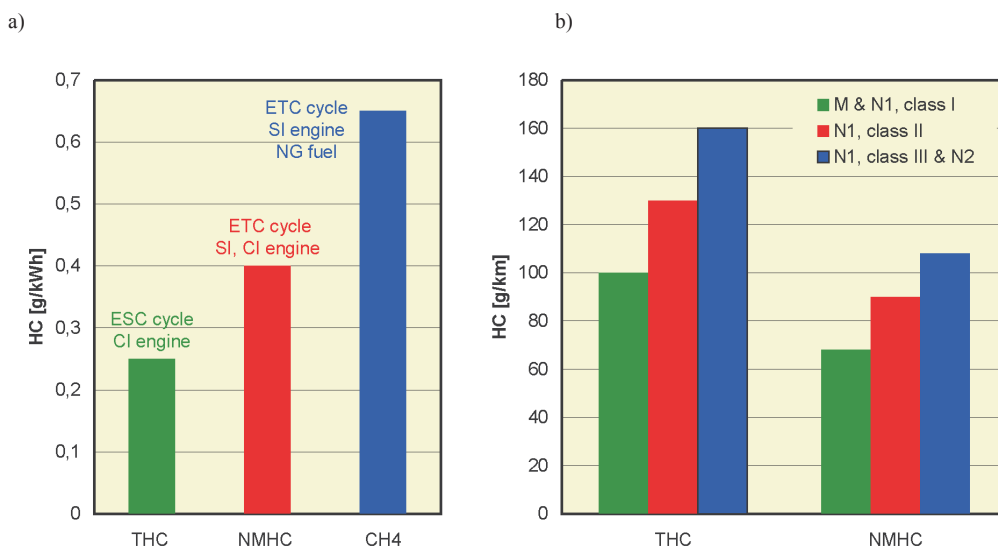


Fig. 1. Admissible values of hydrocarbon emissions: a) currently in force for HDV, b) introduced for LDV with SI engines

Rys. 1. Wartości dopuszczalne emisji węglowodorów: a) obecnie obowiązujące dla silników pojazdów ciężkich, b) wprowadzane dla pojazdów lekkich z silnikami o ZI

it enters the FID analyzer in the laboratory. This removal is done through oxidation of the hydrocarbons (except methane) into carbon dioxide and water. In an ideal case the cutter will not oxidize methane at all (oxidation efficiency 0) but it should entirely oxidize the outstanding hydrocarbons and other organic compounds (oxidation efficiency 1). In practice the efficiencies of this device are 0 and 1 respectively.

In order to determine the efficiency in relation to methane the mixture of this hydrocarbon with a synthetic air is put through the FID analyzer after it passes the cutter and omitting the cutter. The efficiency is obtained:

$$E_M = 1 - \frac{c_{HCW}^M}{c_{HCW/O}^M} \quad (1)$$

The efficiency of non-methane hydrocarbons is determined in a similar way only a mixture of ethane and synthetic air is applied here. The efficiency is obtained:

$$E_E = 1 - \frac{c_{HCW}^E}{c_{HCW/O}^E} \quad (2)$$

efficiency E_M is generally higher than 0.07 but E_E falls in the range of 0.98–1.00. For the measurement a system of one or two FID analyzers is used (Fig. 2). If there is only one analyzer the analyses of hydrocarbons with and without the cutter cannot be done simultaneously, which limits the application of such a system.

The FID analyzers must comply with the requirements set forth in the regulations as to the response to the content of certain hydrocarbons. The most significant is the response coefficient for methane R_f . It should fall in the range of 1–1.15 when the analyzer is calibrated with propane.

The measurement method of hydrocarbons set forth in directive 2005/55/WE and regulation 49, series 04 of the amendments has been partly copied from the ISO 16183 [13]. A similar method is given in GTR 4 [14]. The regulations set forth in the said acts do not clearly state which gas should be applied to calibrate the FID analyzers for the analysis of the exhaust with the use of a cutter. Some regulations say it should be propane as it is in the case when the cutter is omitted, others are quite contrary. From the information obtained from the authors of these regulations we can judge that their intention was to apply propane.

Based on the results of the hydrocarbon concentration measurement when the exhaust gases flow through the cutter and when the cutter is omitted we can determine the concentration of methane as follows:

$$c_{CH_4}^P = \frac{c_{HCW}^S - c_{HCW/O}^S \times (1 - E_E)}{E_E - E_M} \quad (3a)$$

It is assumed that the concentration of total hydrocarbons equals the concentration of the hydrocarbons as measured when the exhaust gases omit the cutter:

proporcjonalna do przebiegu lub mocy silnika. Dalsza analiza dotyczy stężenia i gęstości, które są parametrami specyficznymi dla danego zanieczyszczenia, w tym także poszczególnych rodzajów węglowodorów.

2. Stężenie węglowodorów w spalinach

Zasada pomiaru stężenia węglowodorów w przypadku ich podziału na wymienione trzy rodzaje jest taka sama dla pojazdów lekkich i silników pojazdów ciężkich. Pobrana próbka spalin jest analizowana dwukrotnie. Pierwsza analiza jest przeprowadzana za pomocą analizatora FID, w taki sam sposób jak przy pomiarze HC przed wprowadzeniem podziału. Druga analiza jest natomiast przeprowadzana również za pomocą analizatora FID, lecz po usunięciu z próbki węglowodorów niemetaanowych. Stężenie metanu, węglowodorów niemetaanowych i węglowodorów całkowitych określa się na podstawie wyników tych dwóch analiz.

Do usunięcia z próbki węglowodorów niemetaanowych przed jej wejściem do analizatora FID w laboratoriach badań emisji zanieczyszczeń z pojazdów jest powszechnie stosowane urządzenie nazywane separatorem (*cutter*). Usunięcie to następuje przez utlenienie węglowodorów, z wyjątkiem metanu, na dwutlenek węgla i wodę. W przypadku idealnym separator nie powinien w ogóle utlenić metanu (sprawność utlenienia równa 0), natomiast powinien całkowicie utlenić pozostałe węglowodory i inne związki organiczne (sprawność utlenienia równa 1). W praktyce sprawności tego urządzenia różnią się od odpowiednio 0 i 1.

W celu określenia sprawności w odniesieniu do metanu przepuszcza się mieszaninę tego węglowodoru z powietrzem syntetycznym przez analizator FID po przejściu przez separator i z pominięciem tego urządzenia. Sprawność tę oblicza się za pomocą wzoru (1).

Sprawność w odniesieniu do węglowodorów niemetaanowych określa się w podobny sposób, z tym że stosuje się w tym celu mieszaninę etanu i powietrza syntetycznego. Oblicza się tę sprawność wzorem (2).

Sprawność E_M jest na ogół nie większa niż 0,07, natomiast E_E jest zawarta w przedziale 0,98–1,00. Do pomiaru stosuje się układ zawierający albo jeden, albo dwa analizatory FID (rys. 2). W przypadku jednego analizatora analizy węglowodorów przy przepływie spalin przez separator i z jego pominięciem nie mogą być przeprowadzane jednocześnie, co ogranicza zakres stosowania tego układu.

Analizatory FID muszą spełniać ustalone w przepisach wymagania odnośnie do odpowiedzi na zawartość niektórych

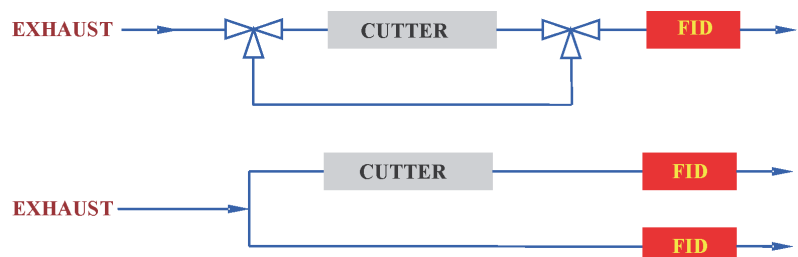


Fig. 2. Schematics of a system for the measurement of hydrocarbon concentration in the exhaust gases

Rys. 2. Schemat układu do pomiaru stężenia węglowodorów w spalinach

$$c_{\text{THC}}^{\text{P}} = c_{\text{HCW/O}}^{\text{S}} \quad (3b)$$

based on that we determine the non-methane hydrocarbon concentration:

$$\begin{aligned} c_{\text{NMHC}}^{\text{P}} &= c_{\text{HCW/O}}^{\text{S}} - c_{\text{CH}_4}^{\text{P}} = \\ &= \frac{c_{\text{HCW/O}}^{\text{S}} \times (1 - E_{\text{M}}) - c_{\text{HCW}}^{\text{S}}}{E_{\text{E}} - E_{\text{M}}} \end{aligned} \quad (3c)$$

The method of hydrocarbons measurement set forth in the new rules of the UE for light duty vehicles (chassis dynamometer tests) differs from the one described above. The FID analyzer for the measurements when the gases flow through the cutter is calibrated with methane but the analyzer for the measurements when the gases omit the cutter – with propane.

It is assumed that the concentration of total hydrocarbons equals the concentration of the hydrocarbons as measured when the exhaust gases omit the cutter:

$$c_{\text{THC}}^{\text{P}} = c_{\text{HCW/O}}^{\text{S}} \quad (4a)$$

and the methane concentration equals that measured when the exhaust gases flow through the cutter:

$$c_{\text{CH}_4}^{\text{P}} = c_{\text{HCW}}^{\text{S}} \quad (4b)$$

The concentration of non-methane hydrocarbons is determined as follows:

$$c_{\text{NMHC}}^{\text{P}} = c_{\text{HCW/O}}^{\text{S}} - R_{\text{f}} \times c_{\text{HCW}}^{\text{S}} \quad (4c)$$

In order to evaluate the hydrocarbon measurement methods set forth in the regulations a model has been developed depending on the FID analyzer calibration. The following marks have been given to enable differentiation of the measurement results:

c_{X}^{R} – actual X hydrocarbon concentration in the exhaust gases,

c_{X}^{P} – X hydrocarbon concentration in the exhaust gases determined through the method set forth in the regulations (formulas (3) and (4)),

c_{X}^{A} – X hydrocarbon concentration in the exhaust gases determined through the developed model.

The model assumed that the measured sample contains methane of a concentration of $c_{\text{CH}_4}^{\text{R}}$ and non-methane hydrocarbons of a concentration of $c_{\text{NMHC}}^{\text{R}}$ while the latter are expressed as propane. The concentration of the total hydrocarbons $c_{\text{THC}}^{\text{R}}$ is a sum of $c_{\text{CH}_4}^{\text{R}}$ and $c_{\text{NMHC}}^{\text{R}}$.

The analysis carried out by the authors showed that in the developed model the result of the hydrocarbon concentration measurement depends on the following parameters of the measuring system:

- response coefficient for methane R_{f} of the FID analyzer,
- cutter efficiency for methane (E_{M})
- cutter efficiency for ethane (E_{E})

węglowodorów. Znaczenie ma przede wszystkim współczynnik odpowiedzi dla metanu R_{f} . Powinien on być zawarty w przedziale 1–1,15 przy wzorcowaniu analizatora propanem.

Metodę pomiaru stężenia węglowodorów ustaloną w dyrektywie 2005/55/WE i regulaminie 49, seria 04 poprawek częściowo skopiowano z normy ISO 16183 [13]. Podobna metoda jest podana także w GTR 4 [14]. Przepisy ustalone w wymienionych aktach nie podają w sposób jednoznaczny, jaki gaz należy stosować do wzorcowania analizatora FID przy analizie z przepływem spalin przez separator. Niektóre przepisy wskazują, że powinien to być propan, podobnie jak przy analizie z pominięciem separatora, natomiast inne przeczą tej możliwości. Z informacji uzyskanych od autorów przepisów wynika, że ich intencją było stosowanie propanu.

Na podstawie wyników pomiaru stężenia węglowodorów przy przepływie spalin przez separator i z pominięciem tego urządzenia określa się stężenie metanu według wzoru (3a).

Przyjmuje się, że stężenie węglowodorów całkowitych jest równe stężeniu zmierzonemu przy przepływie spalin z pominięciem separatora – wzór (3b).

Na tej podstawie określa się stężenie węglowodorów niemetaanowych – wzór (3c).

Metoda pomiaru stężenia węglowodorów ustalona w nowych rozporządzeniach UE dla pojazdów lekkich (badania na hamowni podwoziowej) różni się od przedstawionej wyżej. Analizator FID do analizy przy przepływie spalin przez separator jest wzorcowany metanem, natomiast do analizy z pominięciem separatora – propanem.

Przyjmuje się, że stężenie węglowodorów całkowitych jest równe zmierzonemu przy przepływie spalin z pominięciem separatora – (4a), a stężenie metanu równe zmierzonemu przy przepływie spalin przez separator – (4b).

Stężenie węglowodorów niemetaanowych jest określane wzorem (4c).

W celu oceny metod pomiaru stężenia węglowodorów ustalonych w przepisach opracowano model pomiaru w zależności od sposobu wzorcowania analizatora FID. Wprowadzono podane oznaczenia umożliwiające różnicowanie wyników pomiarów:

c_{X}^{R} – stężenie rzeczywiste węglowodoru X w spalinach,

c_{X}^{P} – stężenie węglowodoru X w spalinach określone według metody podanej w przepisach (wzory (3) i (4)),

c_{X}^{A} – stężenie węglowodoru X w spalinach określone na podstawie opracowanego modelu.

W modelu przyjęto, że próbka spalin podlegająca pomiarowi zawiera metan o stężeniu $c_{\text{CH}_4}^{\text{R}}$ i węglowodory niemetaanowe o stężeniu $c_{\text{NMHC}}^{\text{R}}$, przy czym te ostatnie są wyrażone jako propan. Stężenie węglowodorów całkowitych jest sumą $c_{\text{THC}}^{\text{R}}$ i $c_{\text{NMHC}}^{\text{R}}$.

Analiza przeprowadzona przez autorów wykazała, że w opracowanym modelu wynik pomiaru stężenia węglowodorów zależy od następujących parametrów układu pomiarowego:

- współczynnika odpowiedzi dla metanu R_{f} analizatora FID
- sprawności separatora dla metanu (E_{M})

– k ratio of the cutter efficiency for propane (E_p) and ethane (E_E).

The analysis also showed that the impact of these parameters depends on the following:

- the gas applied for the calibration of the FID analyzer measuring the concentration downstream the cutter: methane, propane
- the way of the FID analyzer calibration (analyzer measuring the concentration downstream the cutter: the reference gas flows through the cutter, the reference gas does not flow through the cutter.)

Hence, in theory we have four ways of calibrating the device:

- a) calibration with propane, reference gas flows through the cutter (Fig. 3a),
- b) calibration with propane, the reference gas does not flow through the cutter (Fig. 3b),
- c) calibration with methane, reference gas flows through the cutter (Fig. 3c),
- d) calibration with methane, the reference gas does not flow through the cutter (Fig. 3d).

In practice solution a) cannot be applied as the cutter would almost entirely remove propane and the calibration would turn out impossible. The method as in b) is used to measure the concentration of hydrocarbons in the exhaust gases of heavy duty vehicles.

For light duty vehicles the regulations are imprecise. They state that methane should be used for the calibration of the FID analyzer measuring the concentration downstream the cutter. They do not clearly state whether the reference gas (methane) should flow through the cutter or not. Thus, solutions c) or d) are compliant with the regulations

For solutions b), c) and d) of the developed model precise formulas were derived to calculate the actual concentrations of the total hydrocarbons, methane and non-methane hydrocarbons in the exhaust gases based on the results of the concentration measurement when the exhaust gases flow through the cutter and when they omit the cutter depending on parameters R_p , E_M , E_E i k (tab. 1). When entering these parameters assumptions were made that, as stated above, propane is a representative compound for non-methane hydrocarbons and that in the case of a two FID analyzer system (Fig. 2), their response coefficients are identical.

The correctness of these formulas was verified: it was stated that if there were no measurement errors then the concentrations determined on their basis correspond to the actual ones i.e. $c_{CH_4}^A = c_{CH_4}^R$, $c_{NMHC}^A = c_{NMHC}^R$ and $c_{THC}^A = c_{THC}^R$.

From the comparison of formulas (3) and (4) given in the regulations with the ones in Table 1 it results that not in each case are all the parameters of the measurement system included that are impactful on the hydrocarbon concentration measurement results. In the case of heavy duty vehicle engines – formula (3a) for methane concentration, given in the regulations differs from the accurate one by the fact that the coefficient of FID analyzer response for methane is not included. The k ratio of cutter efficiency for propane and ethane does not occur but the analysis showed that it does

– sprawności separatora dla etanu (E_E)

– stosunku k sprawności separatora dla propanu (E_p) i etanu (E_E).

Analiza wykazała także, że wpływ tych parametrów zależy z kolei od czynników:

- gazu stosowanego do wzorcowania analizatora FID mierzącego stężenie za separatorem: metanu, propanu
- sposobu wzorcowania analizatora FID mierzącego stężenie za separatorem: gaz wzorcowy przepływa przez separator, gaz wzorcowy nie przepływa przez separator.

Teoretycznie występują więc cztery rozwiązania wzorcowania:

- a) wzorcowanie za pomocą propanu, przepływ gazu wzorcowego przez separator (rys. 3a),
- b) wzorcowanie za pomocą propanu, gaz wzorcowy nie przepływa przez separator (rys. 3b),
- c) wzorcowanie za pomocą metanu, przepływ gazu wzorcowego przez separator (rys. 3c),
- d) wzorcowanie za pomocą metanu, gaz wzorcowy nie przepływa przez separator (rys. 3da).

W praktyce rozwiązanie a) nie może być stosowane, gdyż separator usunąłby prawie całkowicie propan i wzorcowanie byłoby niemożliwe. Metoda według rozwiązania b) jest stosowana do pomiaru stężenia węglowodorów w spalinach silników pojazdów ciężkich.

Dla pojazdów lekkich przepisy nie są precyzyjne. Podają one, że do wzorcowania analizatora FID mierzącego stężenie za separatorem powinien być stosowany metan. Nie precyzują natomiast, czy gaz wzorcowy (metan) powinien przepływać, czy też nie przepływać przez separator. W związku z tym pomiarem według przepisów może odpowiadać rozwiązanie c) lub d).

Dla rozwiązań b), c) i d) opracowanego modelu wyprowadzono dokładne wzory na obliczenie rzeczywistych stężeń węglowodorów całkowitych, metanu i węglowodorów niemetaanowych w spalinach na podstawie wyników pomiaru stężeń przy przepływie spalin przez separator i z pominięciem separatora w zależności od parametrów R_p , E_M , E_E i k (tab. 1). Przy ich wyprowadzeniu przyjęto założenia, że, jak podano wyżej, propan jest związkiem reprezentatywnym dla węglowodorów niemetaanowych oraz że w przypadku układu z dwoma analizatorami FID (rys. 2), ich współczynniki odpowiedzi są jednakowe.

Prawidłowość tych wzorów zweryfikowano: stwierdzono, że jeśli nie występują błędy pomiarowe, to określone na ich podstawie stężenia odpowiadają rzeczywistym, czyli

$$c_{CH_4}^A = c_{CH_4}^R, c_{NMHC}^A = c_{NMHC}^R \text{ i } c_{THC}^A = c_{THC}^R.$$

Z porównania wzorów (3) i (4) podanych w przepisach z zestawionymi w tab. 1 wynika, że nie w każdym przypadku są w nich uwzględnione wszystkie parametry układu pomiarowego, wpływające na wyniki pomiaru stężeń węglowodorów. W przypadku silników pojazdów ciężkich wzór (3a) na obliczenie stężenia metanu podany w przepisach różni się od dokładnego tym, że nie występuje w nim współczynnik odpowiedzi analizatora FID dla metanu. Nie występuje także stosunek k sprawności separatora dla propanu i etanu, lecz analiza wykazała, że nie wywiera on w praktyce wpływu na wyniki pomiarów i można go pominąć. Wzór (3c) na obliczenie stężenia NMHC w prze-

not have any impact on the measurement results and can be neglected. Formula (3c) for NMHC concentration in the regulations is identical as the accurate one. The difference in the formulas for methane concentration leads to a difference in the formulas for total hydrocarbons.

For light duty vehicles the formulas given in the regulations do not include parameters E_M , E_E and k . One should note that that there are significant differences in the accurate formulas for solutions c) and d).

The effect of the simplifications assumed in formulas (3) and (4) on the measurement depends on the values of parameters R_f , E_M , E_E and k of the measurement system. In order to determine this influence it was assumed (based on the collected data) for the FID analyzers that:

- coefficient R_f takes values given in the regulations ($1.00 \leq R_f \leq 1.15$)
- efficiency E_M falls in the range 0–0.07
- efficiency E_E falls in the range 0.98–1.00
- ratio k falls in the range 1.00–1.02.

The influence of the above parameters on the measurement results was determined for two compositions of hydrocarbons in the exhaust gases:

- the share of methane in the total hydrocarbons amounts to 0.1 and the share of non-methane hydrocarbons 0.9; such a composition occurs when the engines are fueled with conventional fuels: gasoline, diesel oil and LPG,
- the share of methane in the total hydrocarbons amounts to 0.8 and the share of non-methane hydrocarbons 0.2; such a composition occurs when the engines are fueled with NG.

When the measuring system is characterized by ideal parameters ($R_f = 1$, $E_E = 1$, $E_M = 0$, $k = 1$), the value indicated by the FID analyzer when the exhaust gases flow through the cutter corresponds to the actual concentration of methane and indicated when the gases omit through the cutter – actual

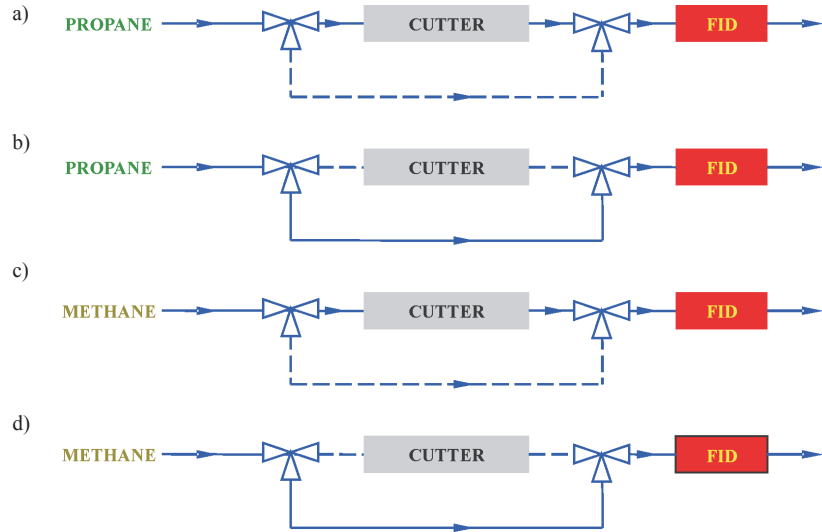


Fig. 3. Schematics of the reference gas flow while calibrating the FID analyzer
Rys. 3. Schemat przepływu gazu wzorcowego przy wzorcowaniu analizatora FID

pisach jest identyczny jak dokładny. Różnica między wzorami na obliczenie stężenia metanu powoduje różnicę we wzorach dla węglowodorów całkowitych.

Dla pojazdów lekkich wzory podane w przepisach nie uwzględniają parametrów E_M , E_E i k . Należy zwrócić uwagę na to, że występują znaczne różnice we wzorach dokładnych dla rozwiązania c) i d).

Table 1. Formulas for concentrations of hydrocarbons in the exhaust gases

Tabela 1. Wzory na obliczenie stężeń węglowodorów w spalinach

Solution/ rozwiązanie	Hydrocarbons/ węglowodory	Formula/ wzór na obliczenie stężenia
b)	Methane/metan $c_{CH_4}^A$	$\frac{c_{HCW}^S - c_{HCW/O}^S \times (1 - k \times E_E)}{R_f \times (k \times E_E - E_M)}$
	Non-methane hydrocarbons/ węglowodory niemetanowe c_{NMHC}^A	$\frac{c_{HCW/O}^S \times (1 - E_M) - c_{HCW}^S}{k \times E_E - E_M}$
	Total hydrocarbons/węglowodory całkowite c_{THC}^A	$\frac{c_{HCW/O}^S \times R_f \times (1 - E_M) + c_{HCW}^S \times (1 - R_f) - c_{HCW/O}^S \times (1 - k \times E_E)}{R_f \times (k \times E_E - E_M)}$
c)	Methane/metan $c_{CH_4}^A$	$\frac{c_{HCW}^S \times R_f \times (1 - E_M) - c_{HCW/O}^S \times (1 - k \times E_E)}{R_f \times (k \times E_E - E_M)}$
	Non-methane hydrocarbons/ węglowodory niemetanowe c_{NMHC}^A	$\frac{(c_{HCW/O}^S - c_{HCW}^S \times R_f) \times (1 - E_M)}{k \times E_E - E_M}$
	Total hydrocarbons/węglowodory całkowite c_{THC}^A	$\frac{(1 - E_M) \times c_{HCW}^S - c_{HCW/O}^S \times (1 - k \times E_E)}{R_f \times (k \times E_E - E_M)}$
d)	Methane/metan $c_{CH_4}^A$	$\frac{c_{HCW}^S \times R_f - c_{HCW/O}^S \times (1 - k \times E_E)}{R_f \times (k \times E_E - E_M)}$
	Non-methane hydrocarbons/ węglowodory niemetanowe c_{NMHC}^A	$\frac{c_{HCW/O}^S \times (1 - E_M) - c_{HCW}^S \times R_f}{k \times E_E - E_M}$
	Total hydrocarbons/węglowodory całkowite c_{THC}^A	$\frac{c_{HCW/O}^S \times [R_f \times (1 - E_M) - (1 - k \times E_E)] + c_{HCW}^S \times R_f \times (1 - R_f)}{R_f \times (k \times E_E - E_M)}$

THC concentration. The difference of these two values is the concentration of NMHC. In this case deviations of the calculation results (simplified formulas as given in the regulations) of the hydrocarbon concentration from the actual values do not occur. This pertains to both light and heavy duty vehicles and all the hydrocarbon compositions.

The maximum differences from the actual values in the calculation results of the concentrations as per the formulas given in the regulations occur for:

- measurement for heavy duty vehicles – value $R_f = 1.15$ (Fig. 4a)
- measurement for light duty vehicles if the calibration is carried out with methane as the reference gas when the gas flows through the cutter (solution (c), tab. 1) – value $E_M = 0.07$ and $kE_E = 0.98$ (Fig. 4b)
- measurement for light duty vehicles if the calibration is carried out with methane as the reference gas omitting the cutter (solution (d), tab. 1) – value $E_M = 0.07$ i $kE_E = 1.00$ (Fig. 4c).

For these values of parameters a comparison of concentrations of hydrocarbons was carried out determined as per the regulations and the actual obtained through the formulas given in Table 1 for the assumed measurement model (Tab. 2).

In the case of heavy duty vehicle engines the largest differences between the concentrations determined as per the regulations and the actual ones are for methane. They fall in the range of 11–15%. For total hydrocarbons the differences to a large extent depend on the exhaust composition. For the composition $c_{CH_4}^R / c_{THC}^R = 0.8$, $c_{NMHC}^R / c_{THC}^R = 0.2$ typical of NG fuelling amount to 12%. For the composition $c_{CH_4}^R / c_{THC}^R = 0.1$, $c_{NMHC}^R / c_{THC}^R = 0.9$ corresponding to gaso-

Efekt uproszczeń przyjętych we wzorach (3) i (4) na wyniki pomiarów zależy od wartości parametrów R_f , E_M , E_E i k układu pomiarowego. W celu określenia tego wpływu przyjęto na podstawie danych zebranych dla analizatorów FID i separatorów, że:

- współczynnik R_f przybiera wartości podane w przepisach ($1,00 \leq R_f \leq 1,15$)
- sprawność E_M jest zawarta w przedziale 0–0,07
- sprawność E_E jest zawarta w przedziale 0,98–1,00
- stosunek k znajduje się w przedziale 1,00–1,02.

Wpływ wyżej podanych parametrów na wyniki pomiaru określono dla dwóch składów węglowodorów w spalinach: – udział metanu w węglowodorach całkowitych wynosi 0,1, a udział węglowodorów niemetaanowych 0,9; taki skład występuje w przybliżeniu w przypadku zasilania paliwami konwencjonalnymi: benzyną i olejem napędowym oraz LPG – udział metanu w węglowodorach całkowitych wynosi 0,8, a udział węglowodorów niemetaanowych 0,2; taki skład występuje w przybliżeniu w przypadku zasilania gazem ziemnym NG.

Gdy układ pomiarowy cechuje się idealnymi parametrami ($R_f = 1$, $E_E = 1$, $E_M = 0$, $k = 1$), wartość wskazywana przez analizator FID przy przepływie spalin przez separator odpowiada rzeczywistemu stężeniu metanu, a wskazywana przy przepływie z pominięciem separatora – rzeczywistemu stężeniu THC. Różnica tych dwóch wskazań jest stężeniem NMHC. W tym przypadku nie występują odchylenia wyników obliczeń stężeń węglowodorów według uproszczonych wzorów podanych w przepisach od wartości rzeczywistych. Dotyczy to zarówno pojazdów lekkich, jak i silników pojazdów ciężkich oraz wszystkich składów węglowodorów.

Maksymalne różnice wyników obliczeń stężeń według wzorów podanych w przepisach od wartości rzeczywistych występują w sytuacjach:

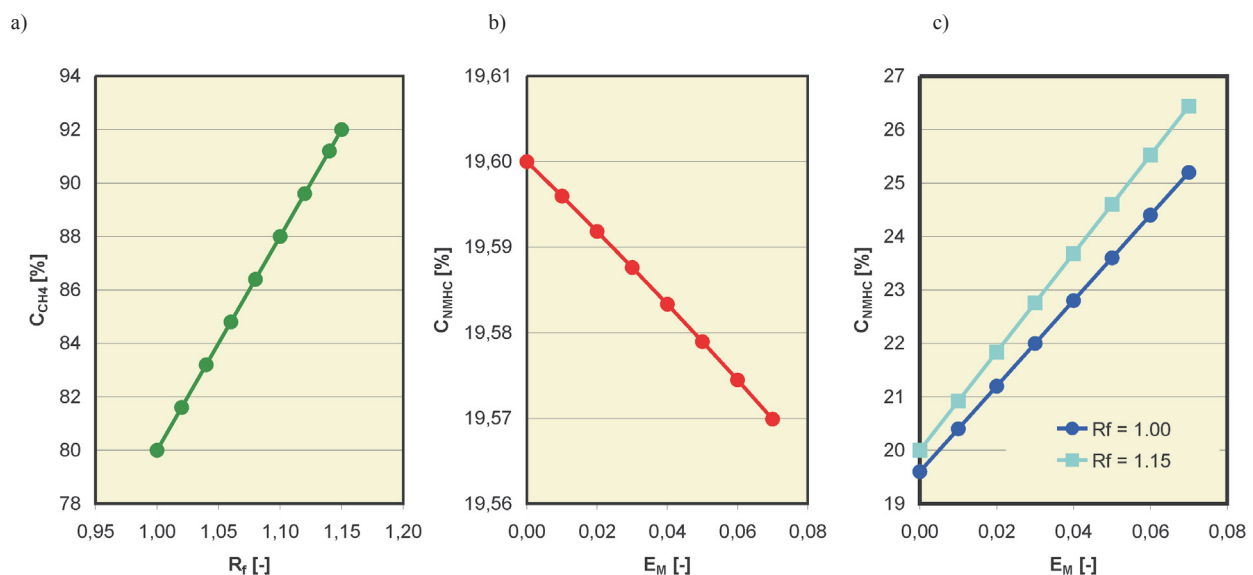


Fig. 4. The influence of: a) coefficient R_f on the concentration of methane determined as per formula (3a); b) efficiency E_M on the concentration of non-methane hydrocarbons determined as per formula (4c) for solution c); c) efficiency E_M on the concentration of non-methane hydrocarbons determined as per formula (4c) for solution d); exhaust gas composition $c_{CH_4}^R / c_{THC}^R = 0.8$, $c_{NMHC}^R / c_{THC}^R = 0.2$

Rys. 4. Wpływ: a) współczynnika R_f na stężenie metanu określone według wzoru (3a); b) sprawności E_M na stężenie węglowodorów niemetaanowych określone według wzoru (4c) dla rozwiązania c); c) sprawności E_M na stężenie węglowodorów niemetaanowych określone według wzoru (4c) dla rozwiązania d); skład spalin, $c_{CH_4}^R / c_{THC}^R = 0,8$, $c_{NMHC}^R / c_{THC}^R = 0,2$

line, diesel oil and LPG fuelling they are much lower (1.5%). For non-methane hydrocarbons the concentrations determined as per the regulations correspond to the actual ones.

For heavy duty vehicle engines meeting the requirements for methane (binding only if fuelled with natural gas) depends not only on the applied after-treatment system but also on the measuring equipment in the homologation institution. The difference in the methane concentrations measured with the analyzer of $R_f = 1$ and $R_f = 1.15$ amounts to 15%.

For light duty vehicles the concentrations determined according to formulas (4) when the reference gas (methane) flows through the cutter (solution c) and when it is omitted (solution d) render similar results to compositions

- pomiaru dla silników pojazdów ciężkich – przy wartości $R_f = 1,15$ (rys. 4a)
- pomiaru dla pojazdów lekkich, jeśli wzorcowanie jest przeprowadzone przy przepływie wzorcowego metanu przez separator (rozwiązanie (c), tab. 1) – przy wartości $E_M = 0,07$ i $kE_E = 0,98$ (rys. 4b)
- pomiaru dla pojazdów lekkich, jeśli wzorcowanie jest przeprowadzone przy przepływie wzorcowego metanu z pominięciem separatora (rozwiązanie (d), tab. 1) – przy wartości $E_M = 0,07$ i $kE_E = 1,00$ (rys. 4c).

Dla tych wartości parametrów przeprowadzono porównanie stężeń węglowodorów określanych według przepisów i rzeczywistych obliczanych według wzorów podanych w tab. 1 dla przyjętego modelu pomiaru (tab. 2).

Table 2. Comparison of concentrations determined as per the regulations and the actual concentrations – calculated through the formulas as given in

Table 1: a) for the composition of hydrocarbons in the exhaust gases $c_{CH_4}^R/c_{THC}^R = 0.1$, $c_{NMHC}^R/c_{THC}^R = 0.9$; b – for the composition of hydrocarbons in the exhaust gases $c_{CH_4}^R/c_{THC}^R = 0.8$, $c_{NMHC}^R/c_{THC}^R = 0.2$

Tabela 2. Porównanie stężeń określanych według przepisów i rzeczywistych obliczanych według wzorów podanych w tabeli 1: a) dla składu węglowodorów w spalinach $c_{CH_4}^R/c_{THC}^R = 0,1$, $c_{NMHC}^R/c_{THC}^R = 0,9$; b) dla składu węglowodorów w spalinach $c_{CH_4}^R/c_{THC}^R = 0,8$, $c_{NMHC}^R/c_{THC}^R = 0,2$

Calibration solution/rozwiązanie wzorcowania	Pollutant/zanieczyszczenie	Actual concentrations equal to the concentrations calculated through formulas given in Table 1 [unit]/stężenia rzeczywiste równe obliczonym wg wzorów tab.1 [jednostka]	Concentrations calculated as per the method given in the regulations [unit]/stężenie obliczone wg metody podanej w przepisach [jednostka]	Difference/różnica [%]
composition a: $c_{CH_4}^R/c_{THC}^R = 0.1$, $c_{NMHC}^R/c_{THC}^R = 0.9$; $c_{THC}^R = 100$ units				
b)	Methane	10	11.2 ¹⁾	+11.2
	Non-methane hydrocarbons	90	90.0¹⁾	0
	Total hydrocarbons	100	101.5¹⁾	+1.5
c)	Methane	10	11.7 ²⁾	+11.7
	Non-methane hydrocarbons	90	88.1²⁾	-2.1
	Total hydrocarbons	100	101.5²⁾	+1.5
d)	Methane	10	10.9 ²⁾	+9.0
	Non-methane hydrocarbons	90	89²⁾	-1.1
	Total hydrocarbons	100	101.5²⁾	+1.5
composition b: $c_{CH_4}^R/c_{THC}^R = 0.8$, $c_{NMHC}^R/c_{THC}^R = 0.2$; $c_{THC}^R = 100$ units				
b)	Methane	80	92 ¹⁾	+15.0
	Non-methane hydrocarbons	20	20¹⁾	0
	Total hydrocarbons	100	112¹⁾	+12.0
c)	Methane	80	80.4 ²⁾	+0.5
	Non-methane hydrocarbons	20	19.6²⁾	-2.2
	Total hydrocarbons	100	112²⁾	+12.0
d)	Methane	80	74.7 ²⁾	-6.6
	Non-methane hydrocarbons	20	26.0²⁾	+32.0
	Total hydrocarbons	100	112²⁾	+12.0

Hydrocarbons for which admissible values are set forth in the regulations have been typed in bold:

¹⁾ as per directive 2005/55, regulation 49 series 04 of the amendments, GTR 4 and ISO 16183,

²⁾ as per rules 715/2007 and 692/2008.

Boldem oznaczono węglowodory, dla których w przepisach są ustalone wartości dopuszczalne:

¹⁾ według dyrektywy 2005/55, regulaminu 49 seria 04 poprawek, GTR 4 i ISO 16183,

²⁾ według rozporządzeń 715/2007 i 692/2008.

$c_{\text{CH}_4}^{\text{R}}/c_{\text{THC}}^{\text{R}} = 0.1$, $c_{\text{NMHC}}^{\text{R}}/c_{\text{THC}}^{\text{R}} = 0.9$ but for compositions $c_{\text{CH}_4}^{\text{R}}/c_{\text{THC}}^{\text{R}} = 0.8$, $c_{\text{NMHC}}^{\text{R}}/c_{\text{THC}}^{\text{R}} = 0.2$ the differences between them are large for methane (the emission of this compound is not covered by the regulations) and non-methane hydrocarbons. For the latter, when the reference gas omits the cutter (solution d) the deviation of the concentration determined according to the formula set forth in the regulations from the actual concentration amounts to 32%. The method of measurement with the calibration using methane omitting the cutter cannot be applied at all for vehicles fuelled with natural gas. The regulations related to light duty vehicles need a more precise statement that the calibration of the FID analyzer should be done when the gas flows through the cutter.

For light duty vehicles fuelled with NG meeting the requirements related to total hydrocarbons depends not only on the after-treatment system but also on the measuring equipment in the homologation institution. The difference in the THC concentrations measured with the analyzer of $R_f = 1$ and $R_f = 1.15$ amounts to 12%.

3. Hydrocarbons density

Before the division of the hydrocarbons into three types was introduced in the legislation a general principle was applied that the composition of the pollutant is similar to the reference fuel. An average ratio of the number of atoms of hydrogen and carbon (H/C) was estimated in the fuel. The hydrocarbons in the exhaust gases were expressed as CH_n where „n” was equal to the value of the estimated H/C. Based on the known dependencies, the density of the hydrocarbons in the exhaust gases was calculated depending on the type of applied fuel. The following H/C values were assumed identical for LDV and HDV:

- for gasoline fuelling – 1.85 (density 0.619 kg/m³)
- for diesel oil fuelling – 1.86 (density 0.619 kg/m³)
- for LPG fuelling – 2.52 (density 0.649 kg/m³)
- for NG fuelling NG – 4.00 (density 0.714).

After the division of hydrocarbons into three types was introduced in the regulations pertaining to HDV the following H/C values were set forth (not applicable to gasoline fuelled vehicles):

- 1.85 for total hydrocarbons when fuelled with diesel oil; when fuelled with LPG and NG the requirements related to THC are not binding
- 4.0 for methane (applied only to NG fuelled vehicles)
- 1.85 for non-methane hydrocarbons when fuelled with diesel oil; 2.52 when fuelled with LPG; 2.93 when fuelled with NG.

Thus, it was assumed that in the case of diesel oil and LPG the H/C ratio, hence the density of THC and NMHC are identical. The principle that the hydrocarbon composition in the exhaust gases is similar to the fuel was extended to non-methane compounds.

The new EU regulations for light duty vehicles assumed that the density of the THC and NMHC is identical. It was determined going on the assumption that the composition of these compounds is similar to the composition of the refer-

W przypadku silników pojazdów ciężkich największe różnice między stężeniami określonymi według przepisów a rzeczywistymi występują dla metanu. Są one zawarte w granicach 11–15%. Dla węglowodorów całkowitych różnice zależą w dużym stopniu od składu spalin. Dla składu $c_{\text{CH}_4}^{\text{R}}/c_{\text{THC}}^{\text{R}} = 0.8$, $c_{\text{NMHC}}^{\text{R}}/c_{\text{THC}}^{\text{R}} = 0.2$ typowego dla zasilania NG wynoszą one 12%. Dla składu $c_{\text{CH}_4}^{\text{R}}/c_{\text{THC}}^{\text{R}} = 0.1$, $c_{\text{NMHC}}^{\text{R}}/c_{\text{THC}}^{\text{R}} = 0.9$ odpowiadającego zasilaniu benzyną, olejem napędowym i LPG są one znacznie mniejsze (1,5%). Dla węglowodorów niemetanowych stężenia określone według przepisów odpowiadają rzeczywistym.

Dla silników pojazdów ciężkich spełnienie wymagań odnośnie do metanu (obowiązujących tylko przy zasilaniu NG) zależy nie tylko od zastosowanego układu ograniczenia emisji zanieczyszczeń, lecz także w znacznym stopniu od wyposażenia pomiarowego w jednostce technicznej prowadzącej badania homologacyjne. Różnica między stężeniami metanu zmierzonymi za pomocą analizatora o $R_f = 1$ i o $R_f = 1.15$ wynosi 15%.

Dla pojazdów lekkich stężenia określone według wzorów (4) przy przepływie gazu wzorcowego (metanu) przez separator (rozwiązanie c) i z pominięciem tego urządzenia (rozwiązanie d) dają zbliżone wyniki dla składu $c_{\text{CH}_4}^{\text{R}}/c_{\text{THC}}^{\text{R}} = 0.1$, $c_{\text{NMHC}}^{\text{R}}/c_{\text{THC}}^{\text{R}} = 0.9$, natomiast dla składu $c_{\text{CH}_4}^{\text{R}}/c_{\text{THC}}^{\text{R}} = 0.8$, $c_{\text{NMHC}}^{\text{R}}/c_{\text{THC}}^{\text{R}} = 0.2$ występują między nimi znaczne różnice dla metanu (emisja tego związku nie jest objęta przepisami) i węglowodorów niemetanowych. Dla tych drugich przy przepływie gazu wzorcowego z pominięciem separatora (rozwiązanie d) odchylenie stężenia określonego według wzoru podanego w przepisach od rzeczywistego wynosi 32%. Metoda pomiaru z wzorcowaniem za pomocą metanu przepływającego z pominięciem separatora nie nadaje się w ogóle do stosowania dla pojazdów zasilanych NG. W przepisach dla pojazdów lekkich niezbędne jest sprecyzowanie, że wzorcowanie analizatora FID powinno następować przy przepływie metanu przez separator.

Dla pojazdów lekkich zasilanych NG spełnienie wymagań odnośnie do węglowodorów całkowitych zależy nie tylko od zastosowanego układu ograniczenia emisji zanieczyszczeń, lecz także od wyposażenia pomiarowego w jednostce technicznej prowadzącej badania homologacyjne. Różnica między stężeniami THC zmierzonymi za pomocą analizatora o $R_f = 1$ i o $R_f = 1.15$ wynosi 12%.

3. Gęstość węglowodorów

Przed wprowadzeniem w przepisach podziału węglowodorów na trzy rodzaje do określenia gęstości stosowano ogólną zasadę, że skład tego zanieczyszczenia w spalinach jest podobny do składu paliwa wzorcowego. Szacowano średni stosunek liczby atomów wodoru i węgla (H/C) w paliwie. Węglowodory w spalinach wyrażano przez węglowódor CH_n , przy czym „n” było równe wartości oszacowanego H/C. Na podstawie znanych zależności obliczano gęstość węglowodorów w spalinach zależną od rodzaju paliwa stosowanego do zasilania pojazdów. Przyjmowano następujące wartości H/C, jednakowe dla pojazdów lekkich i silników pojazdów ciężkich:

ence fuel thus, in this case the same principle introduced prior to the division of hydrocarbon into three types is applied. Yet, because the reference gasoline and reference diesel oil contain bio fuels (oxygen compounds) the density of these fuels is slightly different from the one above.

The fact that we assume an equal density of THC and NMHC tends to increase the emission of the former, determined according to the regulations in comparison to the actual emission. The elevation of the emission of NMHC resulting from the principle adopted in the regulations as to the determining of the density does not exceed 2% for conventional fuels and 4% for LPG

However in the case of NG fuelling the effect is significant. For light duty vehicles the H/C ratio given in the regulations for NMHC amounts to 4.00, and for heavy duty vehicles – 2.93. In theory, it cannot be larger than 3.00. Practically, it is lower because these hydrocarbons contain not only methane but also compounds of H/C lower than 3 (Tab. 3). It is estimated than in the case of NG fuelling the average H/C for NMHC in the exhaust gases amounts to approximately 2. Because of the principle adopted in the regulations related to the determining of the density, the emission of NMHC from light duty vehicles fuelled with NG is elevated by approximately 14%, and heavy duty vehicles by approximately 6%.

Table 3. The emission of selected NMHC depending on the applied fuel (based upon [15])

Tabela 3. Emisja wybranych węglowodorów niemetanowych w zależności od paliwa stosowanego do zasilania (opracowano na podstawie [15])

Hydrocarbons/ węglowodory	H/C ratio/sto- sunek H/C	NMHC emission [mg/km] when fuelled with/emisja przy zasilaniu	
		LPG	CNG
Ethane	3	0.59	0.84
Ethylene	2	1.99	0.80
Propane	2.67	3.31	0
Propylene	2	0.75	0.31
Isobutane	2.5	0.32	0.03
n-butane	2.5	1.48	0.07
Isopentane	2.4	0.72	0.20
n-hexane	2.33	0.75	0.97
Isohexane	2.33	1.45	1.44
n-heptane	2.28	0.70	0.20
n-octane	2.25	0.40	0.14
Isooctane	2.25	1.86	1.94
Benzene	1	2.44	1.25
Toluene	1.14	9.16	5.25
Ethylbenzene	1.25	2.98	1.51
Xylenes	1.25	11.21	5.39
Trimethylben- zenes	1.33	6.92	3.32

4. Conclusions

Until 1990's of the last century the European vehicle emission requirements pertained to total hydrocarbons. Later

- dla zasilania benzyną – 1,85 (gęstość 0,619 kg/m³)
- dla zasilania olejem napędowym – 1,86 (gęstość 0,619 kg/m³)
- dla zasilania LPG – 2,52 (gęstość 0,649 kg/m³)
- dla zasilania NG – 4,00 (gęstość 0,714).

Po wprowadzeniu podziału węglowodorów na trzy rodzaje w przepisach dla pojazdów ciężkich ustalono podane niżej wartości H/C (przepisy nie dotyczą pojazdów zasilanych benzyną):

- 1,85 dla węglowodorów całkowitych przy zasilaniu olejem napędowym; przy zasilaniu LPG i NG nie obowiązują wymagania odnośnie do emisji węglowodorów całkowitych,
- 4,0 dla metanu (wymagania stosują się tylko do pojazdów zasilanych NG),
- 1,85 dla węglowodorów niemetanowych przy zasilaniu olejem napędowym; 2,52 przy zasilaniu LPG; 2,93 przy zasilaniu NG.

Przyjęto więc, że w przypadku oleju napędowego i LPG stosunek H/C, a zatem także gęstość, węglowodorów całkowitych i niemetanowych są jednakowe. Zasadę obowiązującą wcześniej, że skład węglowodorów w spalinach jest podobny jak paliwa, rozszerzono na związki niemetanowe.

W nowych przepisach UE dla pojazdów lekkich przyjęto, że gęstość węglowodorów całkowitych i niemetanowych jest jednakowa. Określono ją przy założeniu, że skład tych związków jest podobny do składu paliwa wzorcowego, a więc i w tym przypadku stosuje się zasadę obowiązującą przed wprowadzeniem podziału węglowodorów na trzy rodzaje. Ponieważ jednak wzorcowa benzyna i wzorcowy olej napędowy zawierają biopaliwa, a więc związki tlenowe, gęstość dla tych paliw różni się nieznacznie od podanej wyżej.

Przyjęcie założenia o równej gęstości węglowodorów niemetanowych i całkowitych oddziałuje w kierunku zwiększenia emisji tych pierwszych, określonej według zasad ustalonych w przepisach, w stosunku do rzeczywistej. Zawyżenie emisji NMHC wynikające z przyjętej w przepisach zasady określenia ich gęstości nie przekracza 2% dla paliw konwencjonalnych i 4% dla LPG

W przypadku zasilania NG efekt ten jest jednak znaczący. Dla pojazdów lekkich stosunek H/C podany w przepisach dla węglowodorów niemetanowych wynosi 4,00, a dla ciężkich – 2,93. Teoretycznie nie może być on większy niż 3,00. W rzeczywistości jest on mniejszy, gdyż węglowodory te zawierają nie tylko etan, lecz także związki o H/C mniejszym, czasem znacznie niż 3 (tab. 3). Szacuje się, że w sytuacji zasilania NG średni stosunek H/C dla NMHC w spalinach wynosi około 2. Ze względu na przyjętą w przepisach zasadę określenia gęstości, emisja węglowodorów niemetanowych z pojazdów lekkich zasilanych NG jest zawyżona o około 14%, a z ciężkich o około 6%.

4. Podsumowanie

Do końca lat dziewięćdziesiątych XX w. wymagania europejskie odnośnie do emisji zanieczyszczeń z pojazdów dotyczyły węglowodorów całkowitych. Następnie zaczęto wprowadzać w przepisach podział węglowodorów na trzy rodzaje: metan CH₄, węglowodory niemetanowe NMHC, węglowodory całkowite THC.

a division of hydrocarbons into three types was instituted in the regulations: methane CH_4 , NMHC and THC.

Initially such a division was obligatory for heavy duty vehicles and currently it is also binding for light duty vehicles. The methods of emission measurement of these three types of hydrocarbons set forth in the regulations are not unified. There are differences in terms of:

- the gas applied for the calibration of the FID analyzer measuring the concentration of methane and propane downstream the cutter
- the manner of the FID analyzer calibration measuring the concentration downstream the cutter: reference gas flows through the cutter, reference gas omits the cutter
- criterion of the determining of a density of NMHC.

The formulas determining the concentration of individual hydrocarbons given in the regulations are simplified. In some cases they do not include all the parameters of the measuring system that have impact on the measurement results of the hydrocarbons concentrations such as: response coefficient for methane R_f of the FID analyzer, cutter efficiency for methane (E_M), cutter efficiency for ethane (E_E) the ratio of cutter efficiency for propane (E_p) and ethane (E_E).

The method of measurement of hydrocarbon concentration set forth in directive 2005/55/WE and regulation 49, series 04 of the amendments as well as ISO 16183 and GTR 4 for heavy duty engines is ambiguous. The regulations of these acts do not state what gas is to be applied for the calibration of the FID analyzer when the exhaust gases flow through the cutter. Some regulations indicate propane (similarly to the analysis when the exhaust gases omit the cutter) and some reject it.

In relation to light duty vehicles the regulations set forth in rules UE 715/2007 and 692/2008 are imprecise. They state that methane should be used to calibrate the FID analyzer measuring the concentration downstream the cutter. They do not clearly state whether the reference gas should flow or omit the cutter.

The above described require a clarification.

The performed analysis showed that the concentrations of hydrocarbons determined according to the regulations sometimes significantly differ from the actual ones. In the case of heavy duty vehicles the largest differences in the concentrations determined according to the regulations and the actual ones are for methane. They may reach 11–15%. For THC the differences for NG fuelling may reach 12%. For NMHC the concentrations determined according to the regulations correspond to the actual ones.

In relation to light duty vehicles the differences in the concentrations of methane and NMHC are significant as determined according to the regulations when the reference gas (methane) flows through the cutter and when it omits the cutter. For the latter when the gas omits the cutter the deviation in the concentration determined according to the formula set forth in the regulations from the actual one amounts to 32%. A steady method of measurement with a calibration through methane omitting the cutter is not applicable for vehicles fuelled with NG. The regulations need to state that

Początkowo taki podział obowiązywał dla silników pojazdów ciężkich, a obecnie zaczęto go także wprowadzać dla pojazdów lekkich. Metody pomiarów emisji tych trzech rodzajów węglowodorów ustalone w przepisach nie są zunifikowane. Występują między nimi różnice pod względem:

- gazu stosowanego do wzorcowania analizatora FID mierzącego stężenie za separatorem: metanu, propanu
- sposobu wzorcowania analizatora FID mierzącego stężenie za separatorem: gaz wzorcowy przepływa przez separator, gaz wzorcowy nie przepływa przez separator
- kryterium określania gęstości węglowodorów niemietanowych.

Wzory na określenie stężeń poszczególnych węglowodorów podane w przepisach są uproszczone. W niektórych przypadkach nie są w nich uwzględnione wszystkie parametry układu pomiarowego wpływające na wyniki pomiaru stężeń węglowodorów, do których należą: współczynnik odpowiedzi dla metanu R_f analizatora FID, sprawność separatora dla metanu (E_M), sprawność separatora dla etanu (E_E) oraz stosunek sprawności separatora dla propanu (E_p) i etanu (E_E).

Metoda pomiaru stężenia węglowodorów ustalona w dyrektywie 2005/55/WE i regulaminie 49, seria 04 poprawek, a także w normie ISO 16183 i GTR 4, dla silników pojazdów ciężkich nie jest jednoznaczna. Przepisy ustalone w tych aktach nie podają jaki gaz należy stosować do wzorcowania analizatora FID przy analizie z przepływem spalin przez separator. Niektóre przepisy wskazują, że powinien to być propan, podobnie jak przy analizie z pominięciem separatora, natomiast inne przeczą tej możliwości.

W odniesieniu do pojazdów lekkich przepisy podane w rozporządzeniach UE 715/2007 i 692/2008 nie są precyzyjne. Podają one, że do wzorcowania analizatora FID mierzącego stężenie za separatorem powinien być stosowany metan. Nie precyzują natomiast, czy gaz wzorcowy – metan – powinien przepływać, czy też nie przepływać przez separator.

Podane wyżej niejasności w przepisach wymagają skorygowania.

Przeprowadzona analiza wykazała, że stężenia węglowodorów określone według przepisów różnią się w niekiedy dość znacznie od rzeczywistych. W przypadku silników pojazdów ciężkich największe różnice między stężeniami określonymi według przepisów a rzeczywistymi występują dla metanu. Mogą one wynieść 11–15%. Dla węglowodorów całkowitych różnice dla zasilania NG mogą osiągnąć 12%. Dla węglowodorów niemietanowych stężenia określone według przepisów odpowiadają rzeczywistym.

W odniesieniu do pojazdów lekkich występują znaczne różnice między stężeniami metanu i węglowodorów niemietanowych określonymi według przepisów przy przepływie gazu wzorcowego (metanu) przez separator i z pominięciem tego urządzenia. Dla tych drugich przy przepływie gazu wzorcowego z pominięciem separatora odchylenie stężenia określonego według wzoru podanego w przepisach od rzeczywistego wynosi 32%. Ustalona metoda pomiaru z wzorcowaniem za pomocą metanu przepływającego z pominięciem separatora nie nadaje się do stosowania dla pojazdów zasilanych NG. W przepisach dla pojazdów lekkich niezbędne jest sprecyzowanie, że wzorcowanie analizatora

the FID analyzer calibration should take place with methane flowing through the cutter.

Meeting the requirements related to the emission of methane from heavy duty vehicles fuelled with NG and THC from light duty vehicles fuelled with NG depends not only on the applied after-treatment system but also on the measuring equipment in the homologation institution which is construed as unaccounted for. Example: a difference in the methane concentrations measured by an analyzer of $R_f = 1$ and $R_f = 1.15$ amounts to 15%.

A unification is desired in the area of the measurement of the concentration and the density in the measurement methods of the hydrocarbons from HDV and LDV. Three ways of FID analyzer calibration should be admitted: 1) through propane, reference gas does not flow through the cutter, 2) through methane, reference gas flows through the cutter and 3) through methane, reference gas does not flow through the cutter.

For the calculations of the concentrations we must use accurate formulas derived within this paper (Tab. 1) not the simplified ones set forth in the regulations. In such a case the results of the concentration measurement for the three given methods of calibration will be identical and will correspond to the actual concentrations of individual hydrocarbons in the exhaust gases.

FID powinno następować przy przepływie metanu przez separator.

Spełnienie wymagań odnośnie do emisji metanu z pojazdów ciężkich zasilanych NG i odnośnie do emisji węglowodorów całkowitych z pojazdów lekkich zasilanych NG zależy nie tylko od zastosowanego układu ograniczenia emisji zanieczyszczeń, lecz także od wyposażenia pomiarowego w jednostce technicznej prowadzącej badania homologacyjne, co uważa się za nieuzasadnione. Przykładowo, różnica między stężeniami metanu zmierzonymi za pomocą analizatora o $R_f = 1$ i o $R_f = 1,15$ wynosi 15%.

Pożądaną jest zuniifikowanie w zakresie pomiaru stężeń i określenia gęstości w metodach pomiaru emisji węglowodorów z silników pojazdów ciężkich i pojazdów lekkich. Powinny być dopuszczone do stosowania trzy sposoby wzorcowania analizatorów FID: 1) za pomocą propanu, gaz wzorcowy nie przepływa przez separator, 2) za pomocą metanu, przepływ gazu wzorcowego przez separator oraz 3) za pomocą metanu, gaz wzorcowy nie przepływa przez separator.

Do obliczeń stężeń należy stosować dokładne wzory wyprowadzone w ramach niniejszego opracowania (tab. 1), a nie uproszczone podane w przepisach. W takim przypadku wyniki pomiaru stężeń dla podanych trzech sposobów wzorcowania będą jednakowe i zgodne ze stężeniami rzeczywistymi poszczególnych węglowodorów w spalinach.

Artykuł recenzowany

Nomenclature/Oznaczenia

ANR	All new registrations/ <i>wszystkie nowe rejestracje pojazdów</i>	c_{THC}	THC concentration determined according to the method set forth in the regulations/ <i>stężenie węglowodorów całkowitych określone według metody ustalonej w przepisach</i>
$c_{\text{HCW}}^{\text{M}}$	FID analyzer reading when the reference gas (methane) flows through the cutter/ <i>wskazania analizatora FID przy przepływie gazu wzorcowego – metanu – przez separator</i>	CH_4	Methane/ <i>metan</i>
$c_{\text{HCW/O}}^{\text{M}}$	FID analyzer reading when the reference gas (methane) omits the cutter/ <i>wskazania analizatora FID przy przepływie gazu wzorcowego – metanu – z pominięciem separatora</i>	CNG	Compressed natural gas/ <i>sprężony gaz ziemny</i>
$c_{\text{HCW}}^{\text{E}}$	FID analyzer reading when the reference gas (ethane) flows through the cutter/ <i>wskazania analizatora FID przy przepływie gazu wzorcowego – etanu – przez separator</i>	E_{E}	Cutter efficiency in relation to NMHC (represented by ethane)/ <i>sprawność separatora w odniesieniu do węglowodorów niemietanowych (reprezentowanych przez etan)</i>
$c_{\text{HCW/O}}^{\text{E}}$	FID analyzer reading when the reference gas (ethane) omits the cutter/ <i>wskazania analizatora FID przy przepływie gazu – etanu – z pominięciem separatora</i>	EM	Cutter efficiency in relation to methane/ <i>sprawność separatora w odniesieniu do metanu</i>
$c_{\text{HCW}}^{\text{S}}$	FID analyzer reading when the exhaust gas flows through the cutter/ <i>wskazania analizatora FID przy przepływie spalin przez separator</i>	E_{P}	Cutter efficiency in relation to propane/ <i>sprawność separatora w odniesieniu do propanu</i>
$c_{\text{HCW/O}}^{\text{S}}$	FID analyzer reading when the exhaust gas omits the cutter/ <i>wskazania analizatora FID przy przepływie spalin z pominięciem separatora</i>	EEV	Enhanced environmentally friendly vehicle/ <i>pojazd przyjazny środowisku</i>
c_{CH_4}	Methane concentration determined according to the method set forth in the regulations/ <i>stężenie metanu określone według metody ustalonej w przepisach</i>	EEC	European Economic Commission/ <i>Europejska Komisja Gospodarcza</i>
c_{NMHC}	NMHC concentration determined according to the method set forth in the regulations/ <i>stężenie węglowodorów niemietanowych określone według metody ustalonej w przepisach</i>	ESC	European steady state cycle/ <i>europejski cykl stacjonarny</i>
		ETC	European transient cycle/ <i>europejski cykl dynamiczny</i>
		Euro	Emission standards in Europe/ <i>normy emisji zanieczyszczeń z pojazdów w Europie</i>
		FID	Flame ionization detector/ <i>plamieniowo-jonizacyjny analizator spalin</i>
		GTR	Global technical regulation/ <i>światowy regulamin techniczny</i>
		HC	Hydrocarbons/ <i>węglowodory</i>
		LPG	Liquid petroleum gas/ <i>gaz ciekły propan-butan</i>
		k	Cutter efficiency ratio for propane and ethane/ <i>stosunek sprawności separatora dla propanu i etanu</i>

NDIR	Non-dispersive infrared/ <i>niedyspersyjny w podczerwieni analizator spalin</i>		
NG	Natural gas/ <i>gaz ziemny</i>	R_f	FID analyzer response coefficient for methane/ <i>współczynnik odpowiedzi analizatora FID dla metanu</i>
NMHC	Non-methane hydrocarbons/ <i>węglowodory niemetanowe</i>	THC	Total hydrocarbons/ <i>węglowodory całkowite</i>
NTA	New type approval/ <i>homologacja nowego typu</i>	EU	European Union/ <i>Unia Europejska</i>
UN/ONZ	United Nations/ <i>Organizacja Narodów Zjednoczonych</i>	SI	Spark ignition/ <i>zapłon iskrowy</i>
PAH	Polycyclic aromatic hydrocarbons/ <i>wielopiersścieniowe węglowodory aromatyczne</i>	CI	Compression ignition/ <i>zapłon samoczynny</i>

Bibliography/Literatura

- [1] United Nations. Agreement concerning the adoption of uniform conditions of approval and reciprocal recognition of approval for motor vehicle equipment and parts. Addendum 14: Regulation No. 15 to be annexed to the Agreement. Uniform provisions concerning the approval of vehicles with a positive-ignition engine with regard to the emission of gaseous pollutants by the engine. E/ECE/324 ECE/TRANS/505 Rev. 1/Add. 14, 11 March 1970.
- [2] Council Directive 70/220/EEC of 20 March 1970 on the approximation of the laws of the Member States relating to measures to be taken against air pollution by gases from positive-ignition engines of motor vehicles. OJ L076, 06.04.1970.
- [3] United Nations. Agreement concerning the adoption of uniform conditions of approval and reciprocal recognition of approval for motor vehicle equipment and parts. Addendum 48: Regulation No. 49. Uniform provisions concerning the approval of diesel engines with regard to the emission of gaseous pollutants. E/ECE/324 ECE/TRANS/505 Rev. 1/Add. 48, 5 April 1982.
- [4] Council Directive 88/77/EEC of 3 December 1987 on the approximation of the laws of the Member States relating to measures to be taken against the emission of gaseous pollutants from diesel engines for use in vehicles. OJ L36, 09.02.88.
- [5] Directive 1999/96/EC of the European Parliament and of the Council on the approximation of the laws of the Member States relating to measures to be taken against the emission of gaseous and particulate emissions from compression engines for use in vehicles, and the emissions of gaseous pollutants from positive ignition engines fuelled with natural gas or liquefied petroleum gas for use in vehicles and amending Council Directive 88/77/EEC. OJ L44/1, 16.2.2000.
- [6] United Nations. Agreement concerning the adoption of uniform conditions of approval and reciprocal recognition of approval for motor vehicle equipment and parts. Addendum 48: Regulation No. 49. Revision 4. Uniform provisions concerning measures to be taken against the emission of gaseous and particulate emissions from compression engines for use in vehicles, and the emissions of gaseous pollutants from positive ignition engines fuelled with natural gas or liquefied petroleum gas for use in vehicles. E/ECE/324 ECE/TRANS/505 Rev. 1/Add. 48/Rev. 4, 13 August 2008.
- [7] Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2007 on type approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information. OJ L 171/1, 29.6.2007.
- [8] Commission Regulation (EC) No. 692/2008 of 18 July 2008 implementing and amending Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2007 on type approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information. OJ L 199/1, 29.7.2008.
- [9] Międzyrządowy zespół do spraw zmian klimatu „Technologie, polityka i działania na rzecz zapobiegania zmianom klimatu”. Instytut Ochrony Środowiska, listopad 1996.
- [10] Annex I Expert Group on the UN FCCC „Policies and Measures for Common Action. Transport Sector Studies. Part 3: Innovation for Sustainable Transport”. OECD, October 1996.
- [11] Kruczyński S.W.: Trójfunkcyjne reaktory katalityczne. Warszawa–Radom 2004.
- [12] Directive 2005/55/EC of the European Parliament and of the Council of 28 September 2005 on the approximation of the laws of the Member States relating to measures to be taken against the emission of gaseous and particulate pollutants from compression-ignition engines for use in vehicles, and the emission of gaseous pollutants from positive-ignition engines fuelled with natural gas or liquefied petroleum gas for use in vehicles. OJ L 275, 20.10.2005.
- [13] International Standard ISO 16183 „Heavy-duty engines – Measurement of gaseous emissions from raw exhaust gas and of particulate emissions using partial flow dilution systems under transient test conditions”.
- [14] Global Registry created on 18 November 2004, pursuant to Article 6 of the Agreement concerning the establishing of global technical regulations for wheeled vehicles, equipment and parts which can be fitted and/or be used on wheeled vehicles (ECE/TRANS/132 and Corr.1). GTR No. 4 – Test procedure for compression-ignition (C.I.) engines and positive-ignition (P.I.) engines fuelled with natural gas (NG) or liquefied petroleum gas (LPG) with regard to the emission of pollutants. ECE/TRANS/ 180/Add.4, 25 January 2007.
- [15] TNO Automotive. TNO Report 03.0R.VM.055.1/PHE “Evaluation of the environmental impact of modern passenger cars on petrol, diesel, automotive LPG and CNG. December 2003.

Prof. Jerzy Merkisz, DSc., DEng. – Professor in the Faculty of Working Machines and Transportation at Poznan University of Technology.

Prof. dr hab. inż. Jerzy Merkisz – profesor na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.

e-mail: jerzy.merkisz@put.poznan.pl



Mr. Stanisław Radzimirski, Ass. Prof., DEng. – Associated Professor in the Motor Transport Institute in Warsaw.

Doc. dr inż. Stanisław Radzimirski – docent w Instytucie Transportu Samochodowego w Warszawie.

e-mail: stanislaw.radzimirski@its.waw.pl

