

Piotr LJEWski  
Jerzy MERKISZ  
Andrzej ZIÓŁKOWSKI  
Łukasz RYMANIAK

PTNSS–2013–SC–121

## Analysis of exhaust emissions in the NTE test of heavy-duty vehicle under real operating conditions

*Abstract: The enforcement of NTE (Not-To-Exceed), dedicated to heavy-duty vehicles (HDV) to check their emission compliance, entailed exhaust emission control within a wider range of engine operation. The NTE procedure is applied only to HDV engines homologated in accordance with American EPA (Environmental Protection Agency) directives. By contrast, European regulations do not apply any such procedures currently. Therefore, the authors of this paper carried out exhaust emission tests on a heavy-duty vehicle in real conditions with the use of a PEMS portable analyzer. The HDV with 15.6 dm<sup>3</sup> displacement applied in the tests weighed 40 000 kg and fulfilled Euro V emission standard. On the basis of the tests, the unit exhaust emission was estimated within the same range of engine operation as determined by the NTE procedure. Following, the unit exhaust emission was referred to the complete exhaust emission recorded during the whole test.*

Keywords: heavy-duty vehicle, NTE test, exhaust emissions test

### Analiza emisji gazów wylotowych wyznaczonej w teście NTE z ciężkiego pojazdu samochodowego na podstawie badań przeprowadzonych w rzeczywistych warunkach jego eksploatacji

*Streszczenie: Wprowadzenie w 2007 roku dodatkowego testu zgodności emisyjnej dla grupy ciężkich pojazdów samochodowych – NTE (Not-To-Exceed) – sprawiło, że emisja gazów wylotowych z tej grupy jest kontrolowana w szerszym zakresie pracy jednostki napędowej. Procedura NTE jest stosowana jedynie dla jednostek napędowych homologowanych według procedur określonych przez amerykańską agencję EPA (Environmental Protection Agency). W przepisach europejskich tego typu procedury nie obowiązują. Ten argument stanowił podstawę do wykonania przez autorów pomiarów emisji gazów wylotowych z ciężkiego pojazdu samochodowego w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Badania wykonano przy użyciu mobilnych analizatorów z grupy PEMS. Obiektem badawczym był pojazd o dopuszczalnej masie całkowitej 40 000 kg wyposażony w jednostkę napędową o pojemności skokowej 15,6 dm<sup>3</sup> i spełniającą normę emisji Euro V. Na podstawie powyższych badań wyznaczono wartości emisji jednostkowej gazów wylotowych w obszarze pracy silnika określonym w procedurze NTE. Następnie powyższe wartości odniesiono do emisji uzyskanej w całym teście badawczym.*

Słowa kluczowe: pojazd ciężarowy, test NTE, badania emisji gazów wylotowych

## 1. Wprowadzenie

Jednym z głównych kierunków światowych trendów badań silników spalinowych jest prowadzenie pomiarów w różnych stanach ich pracy z jednoczesną analizą procesów zachodzących w pozasilnikowych układach oczyszczania gazów wylotowych. W przypadku ciężkich pojazdów samochodowych (HDV – *Heavy Duty Vehicles*) prowadzenie tego typu badań jest utrudnione, ze względu na ich gabaryty, ponieważ prace badawcze realizowane są głównie na silnikowych stanowiskach hamulcowych. W tym wypadku napotyka się wiele trudności, ponieważ do tego typu prac musi być przygotowana odpowiednia infrastruktura badawcza – układ chłodzenia silnika i stanowiska, dostarczenie energii do zasilania hamowni, układ kondycjonowania pomieszczenia etc. W większości

przypadków badania wykonywane są w ustalonych i nieustalonych stanach pracy silnika spalinowego. Jak wskazują doświadczenia wielu badaczy [1–3], prowadzenie pomiarów we wskazanych stanach pracy nie w pełni odwzorowuje rzeczywiste warunki eksploatacji pojazdów ciężarowych. Dopiero pojawienie się na rynku mobilnych analizatorów gazów wylotowych z grupy PEMS umożliwiło prowadzenie pomiarów we wszystkich stanach pracy silnika spalinowego, łącznie z badaniem pozasilnikowych układów oczyszczania gazów wylotowych [1, 2]. Rozszerzenie możliwości badawczych stało się determinantem zarówno do opracowania nowych procedur homologacyjnych, jak i rozszerzenia obowiązujących. To ma na celu stworzenie narzędzi do oceny emisji szkodliwych i toksycznych składników gazów wylotowych w warunkach rzeczywistej eksploatacji pojazdów.

W obowiązujących przepisach homologacyjnych, dotyczących emisji gazów wylotowych, jedynie w przypadku grupy pojazdów HDV wprowadzono dodatkowe procedury określające emisję i przebiegowe zużycie paliwa w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Pierwszymi tego procedurami były wszelkiego rodzaju testy jezdne dla autobusów. W Europie pierwszym reprezentatywnym cyklem jezdny dla autobusów komunikacji miejskiej był test Braunschweig Cycle, który do tej pory uważany jest za cykl reprezentujący najcięższe warunki eksploatacji autobusów [5]. Pomiary w tym cyklu przeprowadzane są na specjalnej hamowni podwozowej przeznaczonej do badań pojazdów z grupy HDV. Następnym krokiem było wprowadzenie testów jezdnych SORT, w których dokonywany jest pomiar przebiegowego zużycia paliwa. Testy SORT stosowane są jako uniwersalne narzędzie do porównania zużycia paliwa przez autobusy komunikacji miejskiej w różnych warunkach: ciężka jazda miejska (SORT 1), średnia jazda miejska (SORT 2) oraz jazda pozamiejska (SORT 3). W Stanach Zjednoczonych również wprowadzono testy dla autobusów komunikacji miejskiej – Manhattan Cycle, New York Cycle etc [5]. Również dla pojazdów ciężarowych wprowadzono nową procedurę kontroli – NTE, która dotyczy oceny emisji toksycznych składników gazów wylotowych w określonym polu pracy silnika spalinowego

## 2. Charakterystyka testu NTE

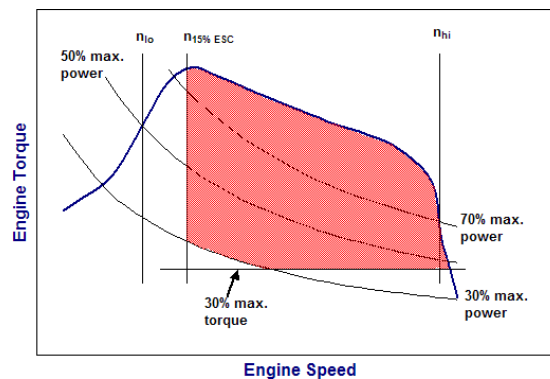
Jak wspomniano powyżej, test NTE wprowadziła amerykańska agencja EPA do oceny emisji toksycznych składników gazów wylotowych z pojazdów ciężarowych w rzeczywistej eksploatacji. Podstawowy obszar kontroli w teście jest ograniczony (rys. 1) [7]:

- prędkością obrotową wału korbowego silnika większą od  $n_0$  określaną na podstawie:

$$n_0 = n_{lo} + 0,15 \times (n_{hi} - n_{lo}) \quad (1)$$

gdzie:  $n_{lo}$  jest prędkością obrotową przy której silnik uzyskuje 50% mocy maksymalnej,  $n_{hi}$  jest prędkością obrotową przy której silnik uzyskuje 70% mocy maksymalnej;

- krzywą maksymalnego momentu obrotowego;
- wszystkimi punktami pracy silnika o wartości momentu obrotowego równego lub większego od 30% momentu maksymalnego (praca silnika powyżej 30% obciążenia włączona jest do obszaru kontroli NTE) przy uwzględnieniu prędkości  $n_0$  (wyłączone są obszary o mocy poniżej 30% mocy maksymalnej);
- wszystkimi punktami pracy, które obejmują 5% obszar minimalnego jednostkowego zużycia paliwa.



Rys. 1. Obszar pracy silnika poddawany kontroli w teście NTE [8]

Aby analizować emisję uzyskaną w obszarze NTE, silnik musi przez przynajmniej 30 s pracować w wyznaczonym obszarze. Na tej podstawie wyznaczane są okna pomiarowe, z których następnie analizowana jest emisja gazów wylotowych.

## 3. Procedura badawcza

Drogowe badania emisji szkodliwych i toksycznych składników gazów wylotowych wykonano na specjalnie wybranym odcinku pomiarowym, którego długość wyniosła 27 km (rys. 2). Przy jego wyborze kierowano się możliwością odwzorowania codziennej eksploatacji pojazdów ciężarowych, dotyczącej ruchu pojazdu po drogach szybkiego ruchu (w tym przypadku wybrano drogi krajowe) oraz dojazdu do miejsca załadunku/rozładunku towaru znajdującego się w dzielnicy przemysłowej miasta, w którym wykonywano pomiary.



Rys. 2. Odcinek pomiarowy wykorzystany do drogowych badań emisji [9]

Obiektem wykorzystanym do badań był pojazd członowy (rys. 3) – ciągnik siodłowy z naczepą o długości 16,5 m (zwany dalej pojazdem ciężarowym). Ten pojazd wyposażony był w silnik o pojemności skokowej  $15,6 \text{ dm}^3$  i mocy maksymalnej 412 kW (rys. 4 i tab. 1). W celu spełnienia

limitów emisji związków szkodliwych gazów wylotowych określonych przez normę Euro V pojazd wyposażono w pozasilnikowy układ SCR (*Selective Catalytic Reduction*). Aby odwzorować warunki codziennej eksploatacji (przewóz towaru), pojazd obciążono ładunkiem o masie 25 000 kg.

Tabela 1. Charakterystyka pojazdu członowego – ciągnika siodłowego z naczepą

| Parametr                             | Wartość                         |
|--------------------------------------|---------------------------------|
| <b>Silnik spalinowy</b>              |                                 |
| Pojemność silnika                    | 15,6 dm <sup>3</sup>            |
| Liczba cylindrów / układ             | 8 / V8                          |
| Moc maksymalna                       | 412 kW przy 1900 obr/min        |
| Maksymalny moment obrotowy           | 2700 N·m przy 1000÷1400 obr/min |
| Norma emisji                         | Euro V                          |
| Układ oczyszczania gazów wylotowych  | SCR                             |
| <b>Pojazd</b>                        |                                 |
| Konfiguracja osi ciągnika siodłowego | 4 x 2                           |
| Masa własna pojazdu członowego       | 15 000 kg                       |
| Masa ładunku                         | 25 000 kg                       |
| Rodzaj ładunku                       | stal                            |
| Typ naczepy                          | kurtynowa                       |



Rys. 3. Pojazdu ciężarowy przygotowany do drogowych badań emisji gazów wylotowych



Rys. 4. Silnik spalinowy badanego pojazdu

Do pomiaru szkodliwych i toksycznych składników gazów wylotowych wykorzystano mobilne analizatory gazów wylotowych z grupy PEMS: SEMTECH DS oraz AVL Micro Soot Sensor. Pierwszy analizator umożliwiał pomiar CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> oraz masowego natężenia przepływu gazów wylotowych (rys. 5a). Analizator posiada własną stację meteorologiczną umożliwiającą pomiar temperatury otoczenia, ciśnienia i wilgotności, dzięki czemu możliwe jest wyznaczenie współczynnika korygującego K<sub>H</sub>. Analizator odczytywał również parametry pracy jednostki napędowej z układu diagnostycznego pojazdu. Drugi z analizatorów wykorzystywał fotoakustyczną metodę pomiaru PM (rys. 5b). Szczegółowy opis powyższych mobilnych analizatorów gazów wylotowych przedstawiono w publikacjach [3, 4, 6].

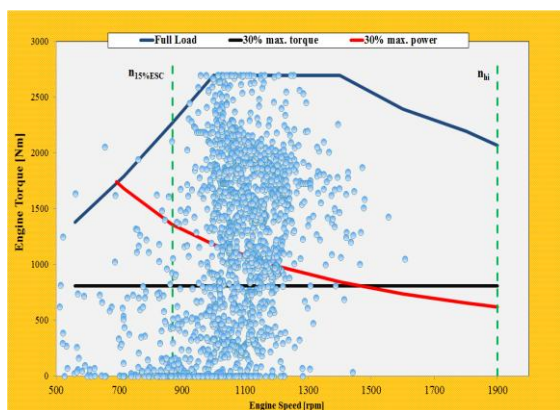


Rys. 5. Mobilne analizatory gazów wylotowych zainstalowane w kabinie pojazdu: a) SEMTECH DS, b) AVL MSS

#### 4. Wyniki badań i dyskusja

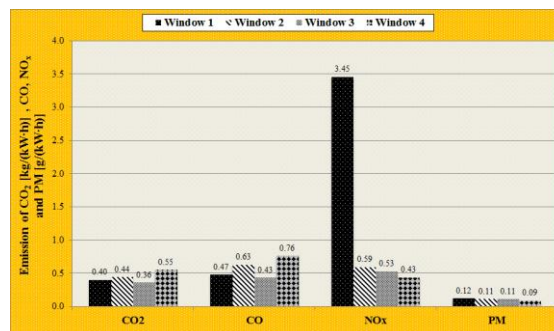
Dla otrzymanego rozkładu punktów pracy silnika podczas przeprowadzonego testu drogowego wyznaczono obszar testu NTE (rys. 6). Analizując wyznaczony zakres testu NTE stwierdzono, że około 50% punktów pracy silnika zawiera się w jego obszarze. Największa liczba punktów pracy w teście NTE zawiera się w przedziale 1000÷1250 obr/min. Taki rozkład punktów pracy wynika przede wszystkim z przebiegu charakterystyki pełnej mocy badanego silnika – w zakresie 1000÷1400 obr/min silnik generuje największy moment obrotowy wynoszący 2700 N·m. Wpływ na taki rozkład punktów pracy miał również fakt zastosowania w badanym pojeździe automatycznej skrzyni biegów. System sterowania układu napędowego nie pozwalał na przekraczanie prędkości obrotowej wału korbowego silnika 1500 obr/min, zmieniając bieg na wyższy przed osiągnięciem wskazanej wartości. Dla najwyższego biegu prędkość obrotowa wału korbowego silnika wynosiła 1250 obr/min.

Dużą koncentrację punktów pracy zarejestrowano również poniżej linii 30% maksymalnego momentu obrotowego. Ten obszar pracy silnika spalinyowego podczas przeprowadzonych pomiarów charakteryzował przede wszystkim moment zwalniania pojazdu oraz zmianę przełożenia skrzyni przekładniowej. Ten fakt potwierdzają zarejestrowane punkty dla biegu luzem (obszar pracy silnika przy zerowym obciążeniu w zakresie wyższych prędkości obrotowych wału korbowego). Pojedyncze punkty, które zarejestrowano poza obszarem charakterystyki pełnej mocy silnika wynikały z błędnego odczytu danych z układu diagnostycznego silnika. Zwrócono także uwagę na dużą liczbę punktów pracy silnika pomiędzy linią 30% mocy maksymalnej, a linią 30% maksymalnego momentu obrotowego. Obszar ten jest wyłączony z kontroli NTE.



Rys. 6. Punkty pracy silnika spalinyowego z zaznaczonym obszarem testu NTE

Aby wyznaczyć emisję jednostkową poszczególnych związków gazów wylotowych w obszarze NTE określono 4 okna pomiarowe, w których silnik spalinyowy pracował przez co najmniej 30 s. Ten czas pracy jest ściśle określony w procedurze NTE. Całkowity czas pracy silnika w wyznaczonych oknach pomiarowych wyniósł 202 sekundy i stanowił 20% całkowitego czasu pracy w obszarze NTE – w odniesieniu do całkowitego czasu trwania testu badawczego obszar ten stanowił jedynie 9%. W oknach pomiarowych wyznaczono emisję jednostkową  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $NO_x$  i  $PM$  jako stosunek sumy masy i-tego związku i sumy mocy wygenerowanej przez silnik w rozpatrywanym obszarze. Wyniki emisji jednostkowej w powyższych oknach pomiarowych przedstawiono na rysunku 7. Z analizy uzyskanych wartości wynika, że jedynie w przypadku emisji jednostkowej  $PM$  uzyskano zbliżone wartości. W pozostałych przypadkach różnice w wartościach emisji wyniosły średnio 20%, dla emisji  $NO_x$  zaobserwowano największą różnicę, która wyniosła około 800%.

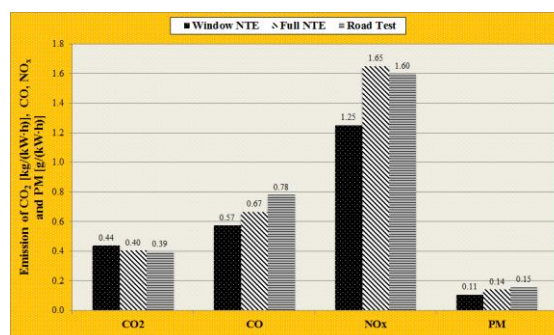


Rys. 7. Emisja jednostkowa  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $NO_x$  i  $PM$  wyznaczone w 4 oknach pomiarowych testu NTE

W celu określenia sumarycznej emisji jednostkowej rozpatrywanych związków gazów wylotowych w obszarze NTE dokonano uśrednienia wartości z wyznaczonych okien pomiarowych. Użytkowano następujące wartości:

- $CO_2$  – 435,59 g/(kW·h),
- $CO$  – 0,57 g/(kW·h),
- $NO_x$  – 1,25 g/(kW·h),
- $PM$  – 0,11 g/(kW·h).

Powyższe wartości odniesiono do emisji jednostkowej wyznaczonej zarówno w całym obszarze NTE, jak i podczas testu badawczego (rys. 8). Analizując przedstawione zależności stwierdzono, że w przypadku związków objętych normami emisji gazów wylotowych ( $CO$ ,  $NO_x$ ,  $PM$ ) najniższe ich wartości uzyskano dla emisji wyznaczonej według procedury NTE – średnia z okien pomiarowych.



Rys. 8. Średnia emisja jednostkowa  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $NO_x$  i  $PM$  uzyskana z 4 okien pomiarowych odniesiona do emisji wyznaczonej z obszaru NTE i z całego testu pomiarowego

## 5. Wnioski

Z przeprowadzonej w artykule analizy wyznaczania emisji jednostkowej według metody uśredniania okien pomiarowych w obszarze NTE stwierdzono, że w przyjętej metodyce badawczej jedynie 10% całkowitego czasu pracy silnika spalinyowego przypadło na wskazany powyżej zakres okien pomiarowych. To potwierdza złożoność problemu doboru trasy pomiarowej do oceny emisji w obszarze NTE. W dalszych pracach wskazane jest opracowanie testu badawczego odwzorowującego rzeczywiste warunki pracy ciężkich pojazdów samo-

chodowych. Opracowywane procedury zgodności emisyjnej w warunkach *on-board* należy dostosować do przeznaczenia pojazdu: pojazdy dystrybucyjne, pojazdy długodystansowe etc., ponieważ w zależności od przeznaczenia, silniki spalinowe tych pojazdów pracują przy różnych parametrach.

Odnosnie pojazdów ciężarowych długodystansowych kolejnym etapem prac autorów będzie

opracowanie nowej metodyki badawczej zakładającej wybór odcinka pomiarowego odwzorowującego stałe parametry pracy silnika spalinowego. Przewidywany jest wybór m.in. odcinka charakteryzującego tryb jazdy autostradowej o długości przynajmniej 30 km.

## Nomenclature/Skróty i oznaczenia

EPA Environmental Protection Agency/*Agencja Ochrony Środowiska USA*  
ESC European Stationary Cycle/*Statyczny Europejski Cykl Badawczy*  
HDV Heavy Duty Vehicle/*ciężki pojazd samochodowy*  
NTE Not-To-Exceed/*obszar kontroli pozatestowej*

PEMS Portable Emissions Measurement System/*mobilny układ do pomiaru emisji gazów wylotowych*  
SCR Selective Catalytic Reduction/*układ selektywnej redukcji katalitycznej*  
SORT Standardised On-Road Test Cycles/*testy jezdne dla autobusów komunikacji miejskiej*

## Bibliography/Literatura

- [1] Y. Gao, M.D. Checkel: Emission Factors Analysis for Multiple Vehicles Using an On-Board, In-Use Emissions Measurement System. SAE Technical Paper Series 2007-01-1327, (2007).
- [2] Merkisz J., Lijewski P., Fuc P., Pielecha J.: Exhaust emission tests from agricultural machinery under real operating conditions. SAE 2010 Commercial Vehicle Engineering Congress, October, 2010, Chicago, IL, USA, SAE Paper 2010-01-1949, (2010).
- [3] Merkisz J., Fuc P.: The Exhaust Emission from Light Duty Vehicles in Road Test in Urban Traffic. SAE Technical Paper Series 2010-01-1558, (2010).
- [4] Merkisz J., Fuć P., Ziółkowski A.: Wpływ masy ładunku na emisję CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> i na zużycie paliwa pojazdu ciężarowego o masie całkowitej powyżej 12 000 kg. Postępy nauki i techniki / Advances in Science and Technology, nr 15/2012; (2012).
- [5] Merkisz J., Molik P., Nowak M., Ziółkowski A.: Cykle jezdne pojazdów komunikacji miejskiej na przykładzie aglomeracji poznańskiej. Logistyka nr 3/2012; (2012).
- [6] Merkisz J., Pielecha J., Fuc P., Lijewski P.: The analysis of the PEMS measurements of the exhaust emissions from city buses using different research procedures. The 8th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference VPPC 2012, Org. KIEE, Paper No. F20120618-0339Seul 9-12.10.2012, s. 903-907.
- [7] Information from Worldwide Emissions Standards. Heavy Duty & Off-Road Vehicles. Delphi brochure 2010/2011. [http://delphi.com/pdf/emissions/Delphi\\_HD.pdf](http://delphi.com/pdf/emissions/Delphi_HD.pdf)
- [8] [www.dieselnet.com](http://www.dieselnet.com)
- [9] [www.GPSVisualiser.com](http://www.GPSVisualiser.com)

Mr Piotr Lijewski, DEng. – doctor in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

*Dr inż. Piotr Lijewski – adiunkt na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.*



Mr Andrzej Ziolkowski, MSc., Eng. – PhD student in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

*Mgr inż. Andrzej Ziółkowski – doktorant na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.*



Mr Jerzy Merkisz, DSc., DEng. – Professor in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

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

Mr Łukasz Rymaniak, MSc., Eng. – PhD student in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

*Mgr inż. Łukasz Rymaniak – doktorant na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.*

