

Jerzy MERKISZ  
 Maciej SIEDLECKI  
 Andrzej ZIÓŁKOWSKI  
 Paweł FUC  
 Piotr LIJEWSKI

PTNSS-2015-3380

## Methods of reducing emission from HDV Euro VI engines

The introduction of Euro VI resulted in a further reduction in toxic emission limits for HDV engines. Methods of meeting the existing standards are a kind of a compromise in reducing the amount of toxic elements and harmful exhaust gases. A particular problem for manufacturers is the reduction of emissions of nitrogen oxides. This article presents methods of reducing the emissions of this compound, and other components of exhaust gases using the latest available methods. An overview of the solutions used by manufacturers of various engines that meet the Euro VI standard used in HDVs was described.

Key words: *emission, HDV, Euro VI*

### Metody ograniczenia emisji zanieczyszczeń z silników pojazdów HDV spełniających normę Euro VI

Wprowadzenie normy Euro VI spowodowało dalsze zmniejszenie limitów emisji związków toksycznych dla silników pojazdów HDV. Metody pozwalające na spełnienie obecnych norm są pewnego rodzaju kompromisem przy zmniejszaniu ilości składników toksycznych i szkodliwych gazów wylotowych. Szczególnym problemem dla producentów jest zmniejszenie emisji tlenków azotu. W artykule zaprezentowano metody ograniczania emisji tego związku oraz innych składników gazów wylotowych najnowszymi dostępnymi metodami pozasilnikowymi. Opiszano przegląd rozwiązań stosowanych przez producentów różnych silników spełniających normę EURO VI montowanych w pojazdach ciężkich HDV.

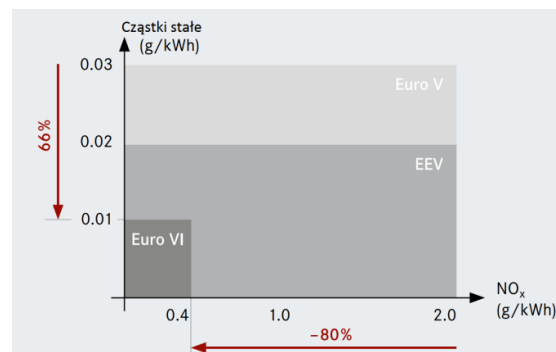
Słowa kluczowe: *emisja, HDV, Euro VI*

### 1. Wprowadzenie

Pojazdy HDV (*Heavy Duty Vehicles*) są wykorzystywane na szeroką skalę przy transporcie ładunków. W pojazdach tych montuje się wyłącznie silniki o zapłonie samoczynnym [1]. Niedoskonałości procesu spalania oleju napędowego wiążą się z emisją szkodliwych składników spalin do atmosfery. W celu zmniejszenia zanieczyszczenia powietrza będącego dużym problemem w XXI wieku wprowadzone zostały normy emisji Euro. Od 2014 obowiązuje norma Euro VI. Do limitowanych związków należą głównie: tlenek węgla (CO), węglowodory (HC), tlenki azotu ( $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$ ), masa i liczba cząstek stałych (PM – *Particulate Matter* PN – *Particulate Number*), oraz amoniak ( $\text{NH}_3$ ). W normie Euro VI limity emisji tlenków azotu zmniejszono o 77%, a cząstek stałych o 66% w stosunku do Euro V (rys. 1) [2,3].

Emisja w nowej normie mierzona jest na podstawie badań silników spalinowych na stanowiskach hamulcowych w znormalizowanych testach WHSC (*World Harmonized Stationary Cycle*) i WHTC (*World Harmonized Transient Cycle*). Doskonałenie przebiegu procesu spalania w silniku nie wystarcza do spełnienia narzuconych limitów emisji składników toksycznych spalin. W celu ich speł-

nienia dodatkowo wykorzystywane są pozasilnikowe układy oczyszczania spalin. Norma nie narzuca



Rys. 1. Porównanie limitów emisji cząstek stałych i  $\text{NO}_x$  w normach Euro V, Euro VI i EEV [2]

metod, które należy wykorzystać, pozostawiając dowolność producentom silników. Zwiększeniu uległ też dystans na którym emisja nie będzie mogła przekroczyć założonych limitów i wynosi dla normy Euro VI 700 000 km lub 7 lat eksploatacji [6]. Artykuł zawiera przegląd metod oczyszczania spalin silników pojazdów HDV w celu spełniania limitów normy Euro VI.

Głównym problemem związanym z eksploatacją pojazdów HDV z silnikami o zapłonie samo-

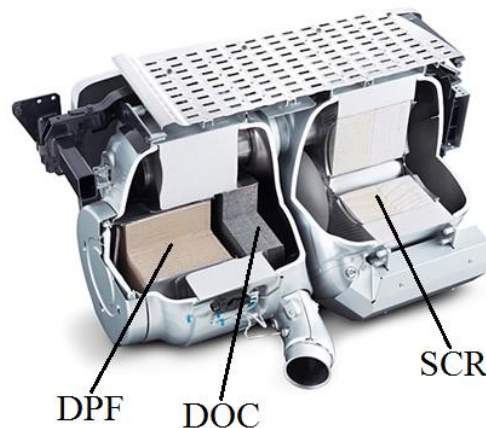
czynnym jest emisja tlenków azotu i cząstek stałych [4]. Duże sprawności maksymalne silników spalinowych wiążą się ze wzmożoną emisją tlenków azotu, jednocześnie zmniejszając masę i liczbę cząstek stałych. Wpływ procesu spalania na zmniejszenie jednego związku powoduje zwiększenie emisji drugiego [4]. W tym celu należy dobrać odpowiednie silnikowe i pozasilnikowe układy ograniczenia emisji spalin. Do podstawowych układów silnikowych należy wysokociśnieniowy, bezpośredni wtrysk paliwa do komory spalania z podziałem dawki paliwa na części, układ recyrkulacji spalin (EGR – *Exhaust Gas Recirculation*) i turbosprężarka ze zmienną geometrią kierownicy turbiny (VGT – *Variable Geometry Turbine*). W przypadku systemów pozasilnikowych, jest to utleniający reaktor katalityczny (DOC – *Diesel Oxidation Catalyst*), selektywna redukcja katalityczna (SCR – *Selective Catalytic Reduction*), filtr cząstek stałych (DPF – *Diesel Particulate Filter*) oraz filtr amoniakalny (ASC – *Ammonia Slip Catalyst*). Elementy te są wykorzystywane przez producentów silników w różnych konfiguracjach.

## 2. Przegląd rozwiązań stosowanych przez różnych producentów

### 2.1 Metody stosowane przez firmę DAF

Podstawę do opracowania nowej konstrukcji silników spełniających europejską normę emisji EURO VI stanowiły silniki dostarczane na rynek amerykański spełniające normę EPA 1065 – PACCAR MX, której limity są zbliżone do normy EURO VI [4]. W silniku PACCAR MX-13 zastosowano wysokociśnieniowy układ wtryskowy typu common rail, który umożliwia podział dawki wtryskiwanego paliwa na trzy części: pilotażową, główną oraz dopalającą. Maksymalne ciśnienie wtrysku paliwa wynosi 250 MPa. Zintegrowany pozasilnikowy układ oczyszczania spalin składa się z utleniającego reaktora utleniającego DOC, filtra cząstek stałych, układu selektywnej redukcji katalitycznej oraz reaktora ograniczającego emisję nieprzereagowanego amoniaku ASC (rys. 2). Kolektor wylotowy i inne elementy układu wylotowego są izolowane w celu osiągnięcia jak największej intensywności pasywnej regeneracji filtra DPF. Jeżeli warunki jazdy nie pozwalają na osiągnięcie 500°C przy wlocie do układu oczyszczania spalin, uruchamiany jest wtrysk paliwa przez dodatkowy wtryskiwacz umieszczony w kolektorze wylotowym. Wytrysk paliwa powoduje zwiększenie temperatury i rozpoczyna aktywną regenerację filtra. Proces ten ułatwia przepustnica zainstalowana w kolektorze wylotowym, która tłumiać ich przepływ. Dla zabezpieczenia filtra SCR przed nadmierną

temperaturą naniesiono dodatkową powłokę katalityczną. Filtr osiąga sprawność 85-95% przy temperaturze 250-275°C [5]. Układ oczyszczania spalin składa się z dwóch części – pierwsza z filtrem cząstek stałych, druga z reaktorem SCR. Umożliwia to lepsze ich rozlokowanie w pojeździe i ułatwia obsługę układu (rys. 2).



Rys. 2. Zintegrowany, pozasilnikowy układ oczyszczania spalin stosowany w silnikach DAF [5]

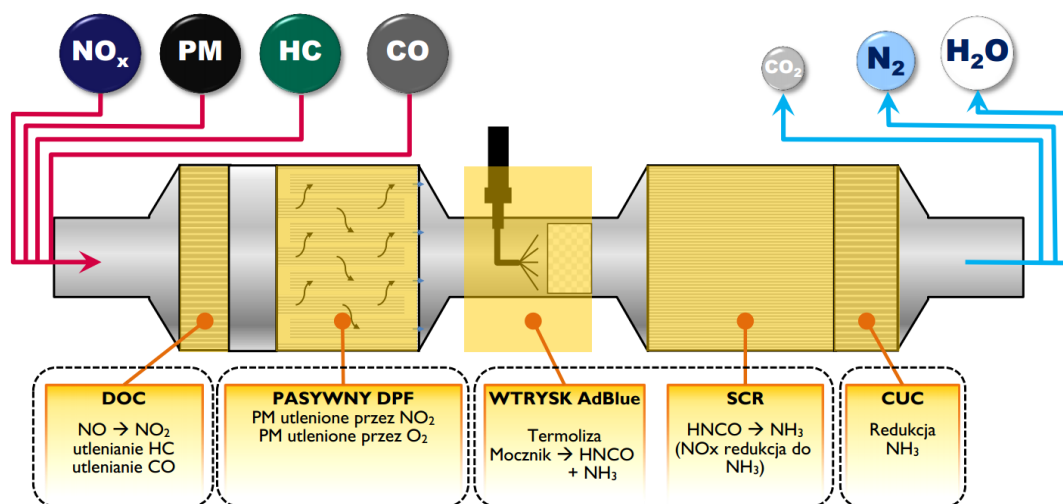
### 2.2 Metody stosowane przez firmę Iveco

Silnik powstały w kooperacji Iveco z FPT Industrial. Wykorzystano w nim układ zasilania typu common rail, którego maksymalne ciśnienie wtrysku wynosi 220 MPa. W celu ograniczenia emisji węglowodorów pochodzących z par oleju zastosowano filtrowanie przedmuchów pochodzących ze skrzyni korbowej. Dla spełnienia limitów określonych w normie Euro V i VI producenci oparli się głównie o technologię SCR, tworząc układ oczyszczania spalin o nazwie HI-eSCR [5].

W skład zintegrowanego pozasilnikowego układu oczyszczania gazów wylotowych wchodzi: reaktor DOC, filtr DPF z regeneracją pasywną, moduł dozujący reduktora AdBlue (32,5 % roztwór mocznika), mieszalnik reduktora, reaktor SCR oraz reaktor utleniający amoniak CUC (*Clean-Up Catalyst*) (rys. 3). Dla spełnienia normy Euro VI zastosowano:

- sterowanie, umożliwiające precyzyjne dozowanie reduktora AdBlue w celu obniżenia ilości emitowanych  $\text{NO}_x$ , doprowadzanych do reaktora SCR,
- adaptacyjny układ dozowania reduktora AdBlue dzięki technologii sterowania opartej a zastosowaniu czujników  $\text{NO}_x$  i  $\text{NH}_3$ ,
- termicznie izolowane mieszanie o dużej turbulencji, umożliwiające jednorodną hydrolizę mocznika i prawidłowy rozkład w przepływie spalin.

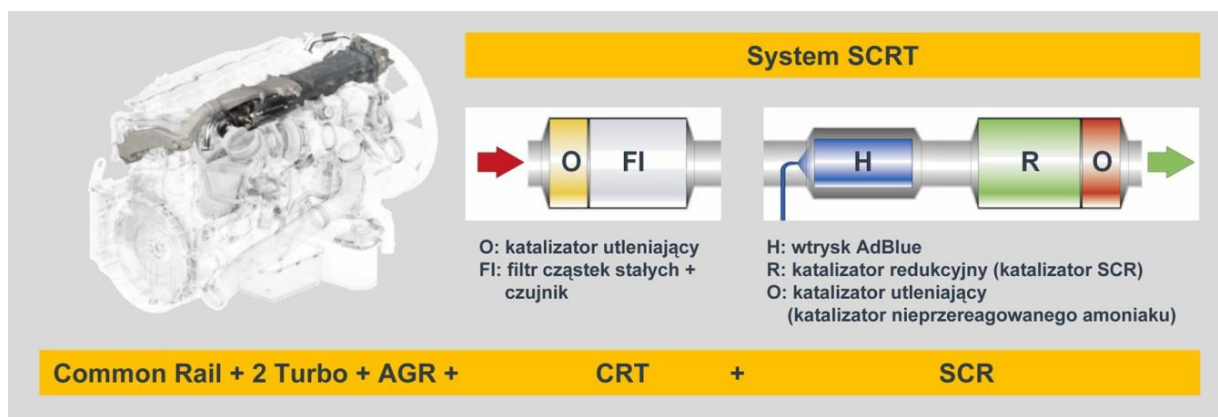
### 2.3 Metody oferowane przez firmę MAN Truck & Bus AG



Rys. 3. Schemat działania układu oczyszczania spalin stosowanego przez Iveco [5]

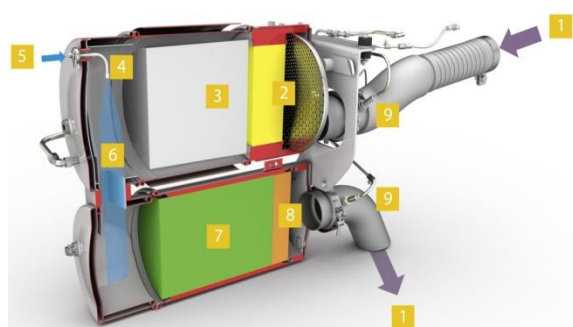
Konstruktorzy firmy MAN do spełnienia wymogów normy EURO VI użyli układu wtryskowy typu common rail (ciśnienie wtrysku do 180 MPa), regulowaną i chłodzoną recyrkulację spalin, dwu-

malnej podczas procesu spalania. Dzięki regulacji układu recyrkulacji spalin przy wykorzystaniu sondy lambda wydajność układu jest dostosowana do każdego punktu pracy silnika również w warunkach dynamicznych.



Rys. 4. Schemat działania układu oczyszczania spalin stosowanego przez firmę MAN [5]

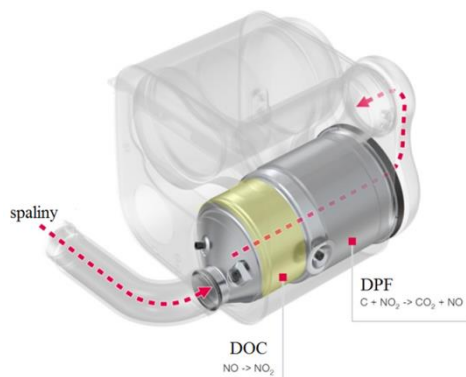
stopniowa turbodoładowanie, filtr SCR ze zintegrowanym reaktorem DOC oraz filtrem DPF nazywany SCRT (rys. 4) [5].



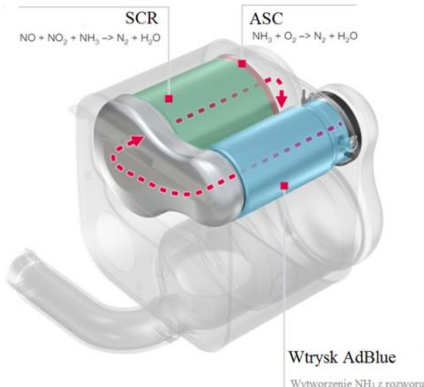
Rys. 5. Schemat systemu SCRT: 1 – wlot strumienia spalin; 2 – DOC; 3 – DPF; 4 – wtryskiwacz AdBlue; 5 – przewód doprowadzający AdBlue; 6 – mieszalnik; 7 – SCR; 8 – reaktor  $\text{NH}_3$ ; 9 – czujniki  $\text{NO}_x$  [5]

Recyrkulacja schłodzonego strumienia spalin umożliwia osiągnięcie niższej temperatury maksymalnej podczas procesu spalania.

Schemat pozasilnikowego układu oczyszczania spalin przedstawiono na rys. 5. System SCRT działa pasywnie. W trybie normalnej jazdy system pracuje w temperaturze spalin, w której regeneracja odbywa się ciągle. Eksploatując pojazd na krótkich trasach lub stojąc w przypadku kongestii jest to niemożliwe. W przypadku braku wymaganej temperatury następuje dodatkowy wtrysk paliwa do układu wylotowego. Kolejną opcją przewidzianą w systemie jest regeneracja postojowa, sterowana przez kierowcę. Układ sterowania zamontowano po prawej stronie pojazdu (rys. 6 i 7), dzięki czemu żadne części nie wystają poza obrys pojazdu.



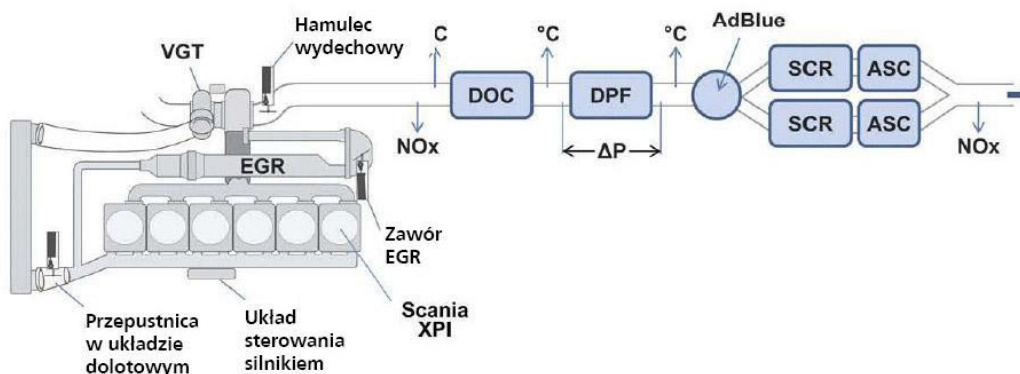
Rys. 6. Schemat układu CRT firmy MAN [5]



Rys. 7. Reaktor SCR firmy MAN [5]

### 3.4. Metody stosowane przez firmę Scania

Wspólnymi cechami silników są: układ wtryskowy common rail (XPI), układu recyrkulacji spalin EGR i turbosprężarka VGT. Masa silnika jest zbliżona do masy jednostek Euro V EGR. Układ wtryskowy doprowadza paliwo z ciśnieniem wtrysku 240 MPa i dzieli dawkę na trzy części w zależności od punktu pracy. O spełnienia normy Euro VI



Rys. 8. Schemat działania układu oczyszczania spalin stosowanego przez firmę Scania [5]

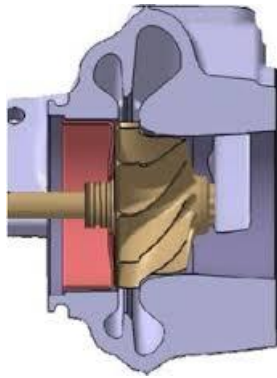
zastosowano nieco mniejszy stopień recyrkulacji spalin niż w Euro V (do 25% z 30%), ponieważ obecność dwóch układów: EGR i SCR, pozwala równoważyć ich działanie [5]. Z myślą o bardziej precyzyjnej regulacji ilości powietrza włączanego do cylindrów, w układzie dolotowym zastosowano przepustnicę (zawór dławiący) z czujnikiem pozy-

cji. Przepustnica ogranicza przepływ powietrza w warunkach małego obciążenia silnika, co sprzyja utrzymywaniu wysokiej temperatury spalin i zapewnieniu maksymalnej sprawności układu SCR [5]. Jako pozasilnikowy układ oczyszczania spalin firma Scania zastosowała reaktor DOC, filtr DPF oraz umieszczone za nim dwa równoległe filtry SCR i następnie reaktory  $\text{NH}_3$  (rys. 8). Opracowano nową technologię elektrycznie uruchamianego zespołu dozującego AdBlue. Roztwór jest wtryskiwany do mieszalnika, w którym, w procesie parowania, wydziela się mocznik napływający do dwóch równoległych reaktorów SCR.

### 3.5. Metody stosowane przez Daimler Trucks

W sześciocylindrowych silnikach o objętości skokowej  $10,7 \text{ dm}^3$  stosowanych w pojazdach ciężarowych Mercedes Benz zastosowano układ common rail X-Pulse. W zasobniku maksymalne ciśnienie osiąga wartość zaledwie 90 MPa. Jest ono zwiększane hydraulicznie we wtryskiwaczach do 210 MPa. Układ wtryskowy umożliwia podział dawki na 5 części w jednym cyklu pracy. Wtryskiwacze posiadają 7 otworków, a szerokość kątaowa strugi paliwa to  $146^\circ$  [5]. Zdaniem producenta wartości te zwiększają możliwość odparowywania wtryskiwanego paliwa. W układzie wylotowym zastosowano wtryskiwacz używany do zwiększenia temperatury gazów wylotowych w celu umożliwienia regeneracji filtra cząstek stałych niezależnie od warunków eksploatacji pojazdu. Kolejnym rozwiązaniem, które wyróżnia tą jednostkę na tle innych konstrukcji, jest zastosowanie turbosprężarki o nieziennej geometrii (FGT) z zaworem upustowym Wastegate. Turbina ma asymetryczne kanały dolotowe (rys. 9).





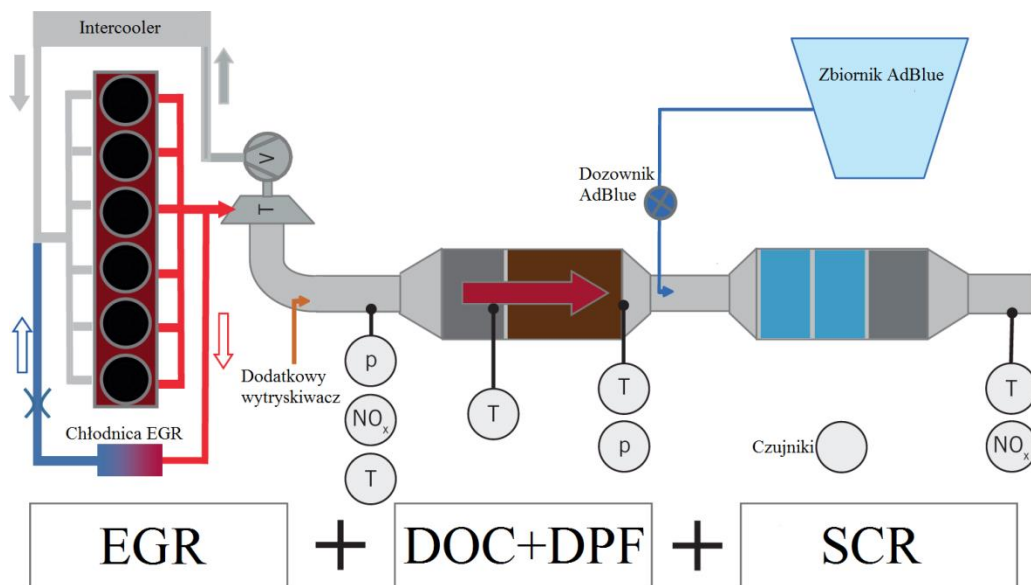
Rys. 9. Asymetryczne kanały dolotowe turbiny zastosowanej w silniku Mercedes Benz Trucks [5]

Zmniejszenie wymiarów przepływowych kanałów w turbinie niweluje spadek ciśnienia poprawia-

celu regeneracji filtra DPF, który podlega jedynie regeneracji pasywnej [5]. Pomagać ma w tym także



Rys. 11. Schemat układu oczyszczania spalin w silnikach Renault Trucks [5]



Rys. 10. Schemat układu oczyszczania spalin w silnikach Daimler Trucks [5]

jąc reakcje turbosprężarki przy małej prędkości obrotowej i obciążeniu silnika. System EGR wyposażony jest w chłodnicę spalin (większą niż w przypadku silników spełniających Euro V). Do redukcji NO<sub>x</sub> zastosowano układ SCR. Cały układ pozasilnikowego oczyszczania spalin został zintegrowany i zamknięty w jednym elemencie (rys. 10).

### 3.6. Metody stosowane przez Renault Trucks

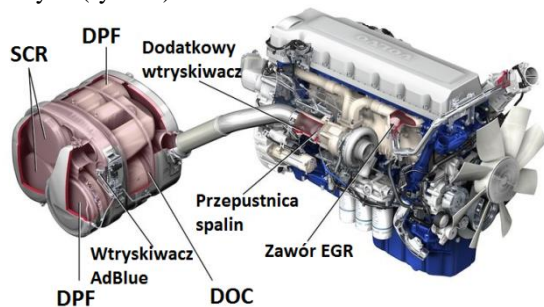
Grupa ta obejmuje sześciocylindrowe jednostki o pojemności skokowej 11 i 13 dm<sup>3</sup>. Ten pierwszy wyposażono w układ wtryskowy common rail (ciśnienie wtrysku 200 MPa), zaś drugi zasilany jest przez pompowtryskiwacze, z których zrezygnowała większość producentów już przy normie EURO V. Zastosowano układ EGR rezygnując z chłodzenia spalin obecnego w poprzednich generacjach silników. Działanie to podyktowane jest potrzebą zwiększenia temperatury gazów wylotowych w

przepustnica zamontowana w układzie wylotowym, która przymykając się zwiększa temperaturę spalin kosztem ich natężenia przepływu. Zwiększenie silnikowej emisji NO<sub>x</sub> niwelowane jest przez udoskonalony filtr SCR. Na początku układu wylotowego tradycyjnie zamontowano reaktor utleniający, a wszystkie układy umieszczono w jednej obudowie (rys. 11).

### 3.7 Metody stosowane przez Volvo Trucks

Producent w celu spełnienia norm emisji spalin wykorzystał SCR, EGR i DPF. Do zasilania wykorzystano pompowtryskiwacze (ciśnienie wtrysku to 200 MPa). Podobnie jak w opisanych wcześniej rozwiązaniach system został zintegrowany w celu jak najlepszego wykorzystania temperatury gazów wylotowych i ograniczenia wymiarów. Do właściwej pracy reaktora SCR wymagane jest przynajmniej 250°C. Układ EGR jest wykorzystywany tylko

do podgrzewania silnika po zimnym rozruchu. Po nagraniu pozostaje wyłączony niezależnie od warunków jazdy nie wpływając na zużycie paliwa, moment obrotowy i moc silnika [5]. W układzie wylotowym jest umieszczona przepustnica mająca za zadanie zwiększać temperaturę spalin oraz dodatkowy wtryskiwacz oleju napędowego, który spalając się podwyższa temperaturę gazów wylotowych (rys. 12)



Rys. 12. Schemat układu oczyszczania spalin w silnikach Volvo Trucks [5]

#### 4. Zestawienie i wnioski

Do spełnienia normy Euro VI producenci zastosowali różne konfiguracje silnikowych i pozasilnikowych układów oczyszczania spalin (tab. 1). Układy wylotowe obecnych silników HDV to połączenie kilku metod mających zmniejszać emisję

wego. W przypadku turbosprężarki większość producentów stosuje zmienną geometrię kierownic turbiny co korzystnie wpływa na przebieg momentu obrotowego.

Mercedes w swoim silniku wykorzystuje turbosprężarkę typu twin scroll, która przy mniejszym skomplikowaniu budowy i sterowania ma także korzystnie wpływać na moment obrotowy. Układ recyrkulacji spalin jest stosowany przez wszystkich producentów poza Iveco. Jest to dość proste rozwiązanie na zmniejszenie emisji tlenków azotu bez użycia reaktorów lub filtrów w układzie wylotowym. Ponad połowa producentów zdecydowała się na instalację w układzie wylotowym przepustnicy mającej zwiększać i konieczne jest zastosowanie dodatkowego wtryskiwacza w układzie wylotowym w celu podniesienia temperatury spalin. Nieodzownym elementem każdego opisywanego silnika jest filtr cząstek stałych i reaktor selektywnej katalitycznej redukcji.

*Prace sfinansowano z funduszy Narodowego Centrum Badań i Rozwoju – projekt badawczy w ramach Programu Badań Stosowanych (umowa nr PBS3/B6/26/2015).*

Tab. 1 Zestawienie rozwiązań stosowanych w silnikach pojazdów HDV w celu ograniczenia emisyjności

	DAF	Iveco	MAN	Scania	Daimler Trucks	Renault	Volvo
System wtryskowy	common rail (220 MPa)	common rail (250 MPa)	common rail (180 MPa)	common rail (240 MPa)	common rail (210 MPa)	Pompo-wtryskiwacze (200 MPa)	Pompo-wtryskiwacze (200 MPa)
Turbosprężarka	VGT	VGT	VGT	VGT	FGT	VGT	VGT
EGR	tak, z chłodnicą	brak	tak, z chłodnicą	tak, z chłodnicą	tak, połączony z połową cylindrów	tak, z chłodnicą	tak
DPF	tak	tak	tak	tak	tak	tak	tak
SCR	tak	tak	tak	tak	tak	tak	tak
Przepustnica w układzie wylotowym	tak	brak	brak	tak	brak	tak	tak
Dodatkowy wtryskiwacz w układzie wylotowym	tak	brak	brak	brak	brak	tak	tak

czenie kilku metod mających zmniejszać emisję składników toksycznych spalin. Występują różnice w stosowanych systemach, gdyż norma Euro VI nie narzuca konkretnych rozwiązań. Większość producentów zrezygnowała z pompowtryskiwaczy i wykorzystuje do zasilania silników system common rail, który cechuje się m. in. uniezależnieniem momentu wtrysku paliwa od kąta obrotu wału korbo-

*The research was funded by the National Centre for Research and Development (Narodowe Centrum Badań i Rozwoju) – research project within the Applied Research Programme (contract No. PBS1/A6/7/2012)*

#### Nomenclature/Skróty i oznaczenia

HDV Heavy Duty Vehicles/pojazdy ciężkie

WHSC World Harmonized Stationary Cycle/  
znormalizowany cykl stacjonarny

WHTC World Harmonized Transient Cycle/  
*znormalizowany cykl stacjonarny*  
PM Particulate Matter/*masa cząstek stałych*  
PN Particulate Number/*liczba cząstek stałych*  
EGR Exhaust Gas Recirculation/*system recyrkulacji spalin*  
VGT – Variable Geometry Turbine/*zmienna geometria kierownic turbiny*

DOC – Diesel Oxidation Catalyst/*reaktor katalizacyjny utleniający*  
SCR – Selective Catalytic Reduction/*selektywna redukcja katalizacyjna*  
DPF – Diesel Particulate Filter/*filtr cząstek stałych*  
ASC – Ammonia Slip Catalyst/*filtr nieprzereagowanego amoniaku*  
CUC Clean-Up Catalyst/*reaktor oczyszczający*

## Bibliography/Literatura

- [1] Merkisz J., Pielecha I.: Alternatywne napędy pojazdów. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2006.
- [2] Bajerlein M., Rymaniak Ł.: Zmniejszenie zużycia paliwa na przykładzie ekologiczne miejskiego autobusu hybrydowego. Applied Mechanics and Materials, Vol. 518, s. 96-101, Miami (USA) 2014.
- [3] Bajerlein M., Rymaniak Ł.: Analiza emisji zanieczyszczeń hybrydowych autobusów miejskich w aspekcie procedur NTE I UE 582/2011. TTS Technika Transportu Szynowego 10/2013 / s. 2773-2782. Radom, 2013.
- [4] Lijewski P., Merkisz J., Fuć P.: The analysis of the emission of particulate matter from non-road vehicles under actual operating conditions. SAE Paper 2012-01-1965.
- [5] Materiały firm: DAF, Iveco, MAN, Scania, Daimler Trucks, Renault, Volvo.
- [6] <http://delphi.com/docs/default-source/catalogs/delphi-worldwide-emissions-standards-pc-ldv-15-16.pdf?sfvrsn=2>

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.*

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

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

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

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



Maciej Siedlecki, MSc., Eng. – PhD student in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

*Mgr inż. Maciej Siedlecki – doktorant na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.*

Paweł Fuć, DSc., DEng. – Professor in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

*Dr hab. inż. Paweł Fuć – profesor na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.*

