

Roberto IMARISIO*
Paolo GIARDINA -PAPA
Massimo SIRACUSA

Nowy silnik wysokoprężny 1,3 dm³ 90 KM¹⁾

Po rozpoczęciu w kwietniu 2003 roku masowej produkcji całkowicie nowego silnika ZS o pojemności 1,3 dm³ z systemem zasilania common rail spełniającego normy emisji spalin Euro 4, wprowadzono ostatnio na rynek jego nowy wariant o mocy od 70 (51,5 kW) do 90 KM (66,0 kW) i momencie obrotowym od 180 do 200 N·m. Aby osiągnąć takie wskaźniki system spalania został całkowicie przeprojektowany, a ciśnienie wtrysku w układzie common rail zostało podniesione z 1400 do 1600 barów, z zachowaniem funkcji wtrysku wielopunktowego, już wcześniej wykorzystywaną w wersji 70 KM. Ponadto, zastosowano małą turbinę ze zmienną geometrią a elementy mechaniczne poprawiono tak, by dostosować je do zwiększonego ciśnienia maksymalnego w cylindrze wynoszącego od 140 do 160 barów.

Aby spełnić normy emisji spalin Euro 4 w szczególnych zastosowaniach charakteryzujących się dużymi obciążeniami silnika w celu zmniejszenia rozrzutu i zwiększenia trwałości dodano nowe funkcje sterowania, jak kontrola współczynnika nadmiaru powietrza w oparciu o czujnik zawartości tlenu.

Niezależnie od zgodności z normą Euro 4 w większości przewidywanych zastosowań z konwencjonalnym systemem oczyszczania spalin DOC, stosowana będzie również wersja z filtrem cząstek stałych (DPF) pracującym w technologii bezobsługowej już stosowanej w silnikach o większej pojemności skokowej.

Rodzina silników 1,3 dm³ SDE produkowana jest w Polsce, w fabryce znajdującej się w Bielsku-Białej posiadającej moc produkcyjną sięgającą 700.000 silników rocznie.

Słowa kluczowe: silnik o zapłonie samoczynnym, wtrysk wielofazowy, system wtrysku common rail, konstrukcja silnika

The new 1.3 L 90 PS diesel engine¹⁾

After the start of mass production in April 2003 of a completely new Euro 4, 1.3 L, common rail Diesel engine, an upgraded variant has been recently developed, with power output increased from 70 to 90 PS and torque output increased from 180 to 200 N·m. To meet this target the combustion system has been deeply revised and common rail pressure increased from 1400 to 1600 bar, while maintaining the multiple injection feature already introduced on the 70 PS variant. Moreover, a variable geometry, small turbocharger has been specifically developed and the mechanical components upgraded to comply with an increased peak cylinder pressure from 140 to 160 bar.

In order to comply with Euro 4 emission standards on critical applications with high load factors new control functions have been developed, in order to reduce the dispersion and the drift in durability, such as the lambda control based on an O₂ sensor.

In spite of Euro 4 emission compliance on most of the forecasted applications with conventional DOC after-treatment, a DPF version will be provided as well, adopting the maintenance free technology already applied on other engines with higher displacement.

The 1.3 L SDE family is manufactured in Poland, in a plant located in Bielsko Biala, with an installed production capacity close to 700.000 engines per year.

Key words: compression engines, multi-phase injection, common rail injection, engine construction

1. Wstęp

Udział silników ZS w rynku samochodów osobowych w Europie systematycznie rośnie w stopniu większym niż oczekiwano biorąc pod uwagę przyrost cen samochodów. Dzieje się tak ze względu na to, że klienci doceniają niskie zużycie paliwa połączone z doskonałymi osiąganiami.

Niedawne wprowadzenie przez producentów niewielkich silników ZS o pojemności poniżej 1,5 dm³ z systemem zasilania common rail pobudziło wzrost sprzedaży takich silników również w klasie małych pojazdów (segmenty A i B), do tej pory zdominowanych przez silniki benzynowe (rys. 1).

Pomiędzy tymi konstrukcjami znajduje się silnik 1,3 dm³ SDE 70 KM wprowadzony na rynek w połowie 2003 roku w wielu modelach Fiata, Lancii, Opla i Suzuki (rys. 2). Silnik ten, produkowany w Bielsku Białej (Polska), w fabryce

1. Introduction

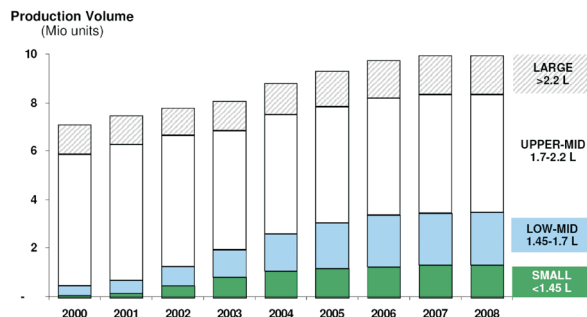
The penetration in the European passenger car market of Diesel engines is continuously growing, more than expected on a cost of ownership basis, due to the appreciation by the customers of low fuel consumption combined with excellent performance.

The recent introduction by some OEMs of small Common Rail Diesel engines, with a displacement less than 1.5 liter, fostered the growth of Diesels also in the small vehicle classes (A and B segments), traditionally dominated by gasoline engines (Fig. 1).

¹⁾ 66 kW; informacje na temat tego silnika przedstawiono także w numerze 2/2005 (121);

66 kW; informations about this engine were also presented in the issue 2/2005 (121).

Growth in Diesel sales by engine segment in the European PC – LDT market



Rys. 1. Małe silniki ZS na rynku samochodów osobowych; przyrost sprzedaży silników ZS wg segmentów rynku na europejskim rynku samochodów osobowych i dostawczych

Fig. 1. Small Diesel engines in the Passenger Car market

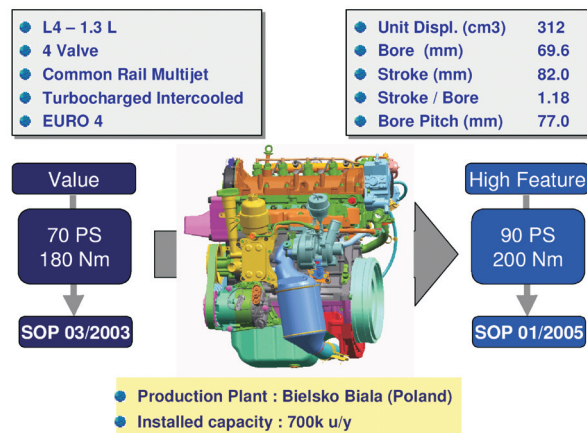
o zdolności produkcyjnej sięgającej 700 tys. sztuk rocznie, można uznać za „wartościowy” wariant nowej rodziny silników.

Po sukcesie rynkowym silnika 1.3 SDE 70 KM w styczniu 2005 powstał wariant o „szczególnych właściwościach”, o mocy zwiększonej do 90 KM, oferujący użytkownikom małych silników ZS doskonale osiągi. W segmencie małych silników ZS typ 1.3 SDE 90 KM jest dziś najmniejszym czterocylindrowym silnikiem o największym stopniu wysilenia²⁾.

W tym artykule opisano najważniejsze zmiany i cechy konstrukcyjne wprowadzone celem zwiększenia osiągow silnika 1.3 SDE z 70 do 90 KM (51,5 do 66 kW).

2. Charakterystyka ogólna rodziny silników SDE

Główne cechy konstrukcyjne rodziny silnika SDE, wspólne dla wersji 70 i 90 KM, pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Cechy ogólne rodziny silników SDE

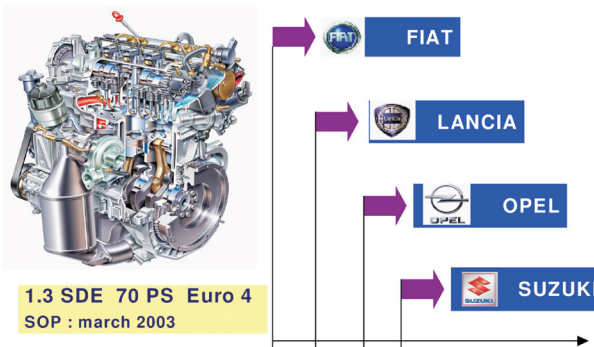
Fig. 3. General features of SDE family

²⁾ Podstawowe wskaźniki: $p_{e,max}=2,42$ MPa, objętościowy wskaźnik mocy $N_f=53,0$ kW/dm³ (przyp. red.).

Among these is 1.3 L SDE 70 PS engine, introduced in the market mid 2003 on many vehicles by Fiat, Lancia, Opel and Suzuki (Fig. 2).

This engine, produced in the Bielsko Biala (Poland) plant, with an installed capacity of about 700k engines per year, can be considered as the “value” variant of a new engine family.

After the success in the market of the 1.3 SDE 70 PS, a “high feature” variant with power output increased to 90 PS has been fully developed and production initiated in January 2005, offering to the customers a small Diesel with outstanding performance.



Rys. 2. Silnik 1.3 SDE i jego zastosowania
Fig. 2. The 1.3 SDE engine and its applications

The 1.3 SDE 90 PS is today in the small Diesel segment the smallest 4-cylinder engine with the highest power density.

In this paper the major design changes and technological features introduced to upgrade the performances of the 1.3 SDE from 70 to 90 PS are described.

2. General characteristics of the SDE family

The main architectural features of the SDE family, common to the 70 PS and 90 PS variants are shown in Fig. 3.

In order to comply with the packaging requirements on A Segment vehicles a bore pitch of 77 mm and a bore diameter of less than 70 mm has been selected, that together with a stroke of 82 mm generates 312 cm³ of cylinder capacity and 1.18 stroke/bore ratio for optimal thermo-dynamical efficiency.

Cylinder head, cylinder block, crankshaft and valve driving systems are common to the two engine variants. Relevant features of the cylinder head (Fig. 4) are:

- 4-valves per cylinder, not only for combustion optimization but also for high volumetric efficiency at high engine speed, in order to maintain high power output up to 5000 rpm. In contrast, the long-stroke figure of 1.18 favours high efficiency in the low engine speed operation.
- DOHC, with valves inclined 3 deg. vs. the vertical axis in order to allow the injector installation. The Bosch CP1-H compact common rail high pressure pump is directly driven by one camshaft, the vacuum pump by the other camshaft.
- Roller finger followers with hydraulic lash adjusters, for low friction and maintenance free operation.

Aby sprostać wymogom dotyczącym wymiarów silnika dla pojazdów segmentu A wybrano odległość cylindrów 77 mm i średnicę cylindra poniżej 70 mm, co wraz ze skokiem tłoka 88 mm daje 312 cm³ pojemności skokowej cylindra i stosunek skoku tłoka do średnicy cylindra wynoszący 1,18, co zapewnia dużą sprawność termodynamiczną.

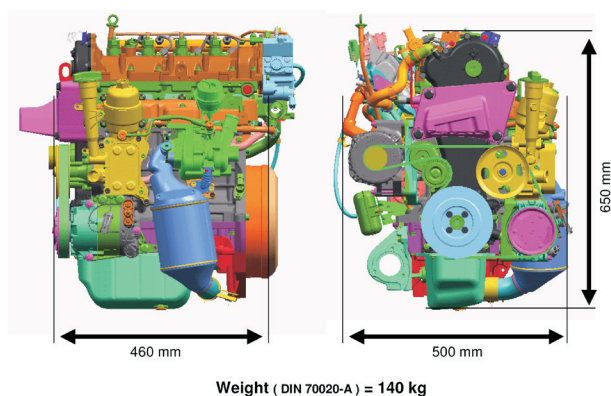
Głowica cylindra, kadłub, wał korbowy i układ rozrządu są wspólne dla obu wariantów silników. Istotne cechy charakterystyczne głowicy (rys. 4) to:

- 4 zawory na cylinder, zastosowane nie tylko w celu optymalizacji spalania, lecz również zwiększenia współczynnika napełniania przy dużej prędkości obrotowej silnika, tak by podtrzymać wysoki poziom mocy do 5000 obr/min. Długoskokowość (1,18) daje natomiast dużą sprawność przy małej prędkości obrotowej.
- Dwa wałki rozrządu w głowicy (DOHC), z zaworami odchylonymi 3 stopnie od osi pionowej, co pozwala na montaż wtryskiwaczy. Zwarta pompa wtryskowa systemu *common rail* Bosch CP1-H jest napędzana bezpośrednio przez jeden wałek rozrządu, a pompa podciśnieniowa – przez drugi.
- Dźwignienki zaworów posiadają hydrauliczną kompensację luzu dla zapewnienia niskiego poziomu tarcia i bezobsługowego działania.
- Zapewniony został poprzeczny przepływ płynu chłodzącego w celu wydajnego chłodzenia i równomiernego rozkładu temperatury.

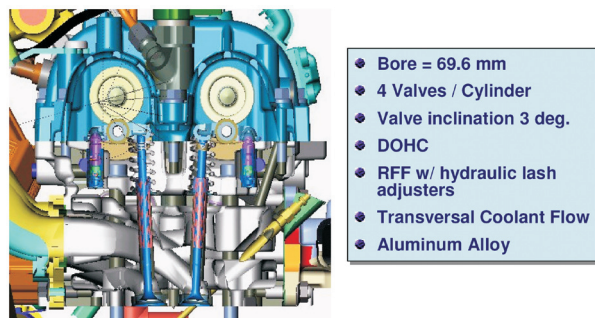
Kadłub silnika jest odlany z żeliwa, posiada aluminiową płytę nośną i wtopione żeliwne panewki łożysk głównych (rys. 5). Takie rozwiązanie zostało wybrane, by uzyskać wymaganą sztywność przy ograniczonych wymiarach, korzystną charakterystykę hałaśliwości, drgań i wytrzymałości przy jednoczesnym zachowaniu prostoty procesu produkcyjnego.

Jak pokazano na rysunku 5, układ napędu rozrządu jest systemem łańcuchowym z bezpośrednim przeniesieniem napędu pomiędzy wałkami rozrządu w tylnej części silnika. Wyboru napędu łańcuchowego dokonano z potrzeby utrzymania niewielkiej długości bloku i zapewnienia bezobsługowej pracy przez cały okres eksploatacji 250 tys. kilometrów.

Opisane cechy konstrukcyjne dały wspaniałe rezultaty w odniesieniu do wymiarów wymaganych ze względu na komorę silnikową i wagi (140 kg), tak jak pokazano na rysunku 6.



Rys. 6. Wymiary i waga silnika
Fig. 6. Packaging and weight

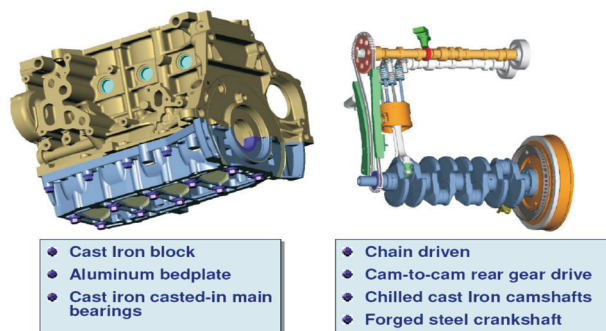


Rys. 4. Głowica silnika
Fig. 4. Cylinder head

- Transversal coolant flow, for efficient cooling and uniform temperature control.

The cylinder block structure is based on a cast iron block with aluminum bedplate and cast iron casted-in main bearings (Fig. 5). This solution has been selected to achieve the required stiffness characteristics, within the size constraints, optimal NVH behaviour and simplified manufacturing processes.

As shown in Fig. 5, the valve driving system is based on a chain and cam-to-cam rear gears. The choice of the chain was driven by the need to keep the engine length as short as possible and to assure maintenance free operation for the total life of 250 000 km.



Rys. 5. Kadłub silnika i układ napędu rozrządu
Fig. 5. Cylinder block and valve driving system

The described design features enabled an excellent result in terms of engine dimensions, as needed for packaging constraints, with a weight of 140 kg in the dressed configuration (Fig. 6).

3. Construction

To increase the power and torque density, operation with an higher peak cylinder pressure, from 140 to 160 bar, had to be considered. To meet this functional requirement design changes to the piston and main journal bearings were needed.

A new piston with a cooling gallery has been developed and main journal bearings of tri-metallic type have been adopted (Fig. 7).

4. Combustion system

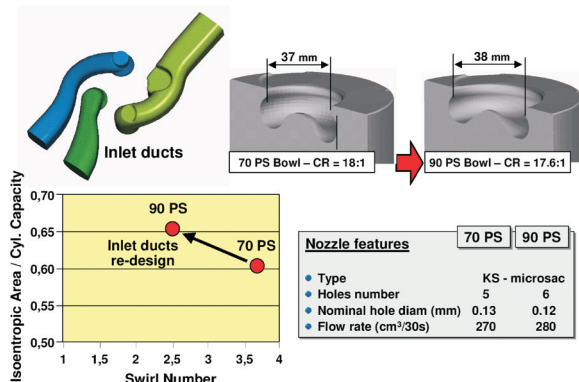
On the 90 PS engine the combustion system has been completely revised, in order to improve the trade off between power output and part load emissions (Fig. 8).

3. Konstrukcja silnika

Podniesienie wskaźników mocy i momentu obrotowego wymagało zwiększenia maksymalnego ciśnienia spalania z 140 do 160 barów. Aby sprostać takim wymaganiom funkcjonalnym konieczne były zmiany konstrukcyjne tłoków i łożysk głównych. Skonstruowano nowy tłok z kanałami chłodzącymi oraz zastosowano trójmetalowe łożyska główne (rys. 7).

4. System spalania

W silniku o mocy 90 KM system spalania został całkowicie przeprojektowany w celu poprawy relacji pomiędzy rozwijaną mocą a emisją spalin przy obciążeniach częściowych (rys. 8).



Rys. 8. System spalania
Fig. 8. Combustion system

Kanały dolotowe zostały zmodyfikowane dla zwiększenia przepustowości przy jednoczesnym zmniejszeniu stopnia zawirowania ładunku po to, by poprawić współczynnik napełniania przy pracy na dużych prędkościach obrotowych. Konstrukcja komory spalania w tłoku również uległa zmianie poprzez zwiększenie jej średnicy i zmniejszenie stopnia sprężania z 18:1 do 17,6:1.

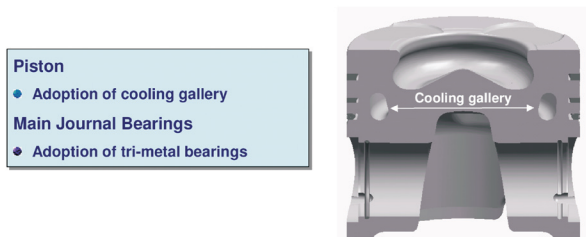
Aby skompensować negatywne skutki zmniejszenia zawirowania przy małych prędkościach obrotowych na przygotowanie mieszanki zastosowano nową końcówkę wtryskiwacza ze zwiększoną liczbą otworów z 5 do 6 przy jednoczesnym zachowaniu prędkości wypływu paliwa z wtryskiwacza, zbliżonej do jej technicznej zdolności dla optymalnego rozpylenia mieszanki i niskiej emisji.

5. Wtrysk paliwa i EMS

System wtryskowy *common rail* rodziny silników SDE sterowany jest układem ECU firmy Magneti Marelli, a elementy paliwowe pochodzą z firmy R. Bosch (rys. 9).

W silniku 90 KM maksymalne ciśnienie paliwa w akumulatorze wysokiego ciśnienia zostało zwiększone z 1400 do 1600 barów poprzez zastosowanie nowej

Measures to increase max cylinder pressure from 140 to 160 bar



Rys. 7. Zmiany konstrukcyjne
Fig. 7. Construction changes

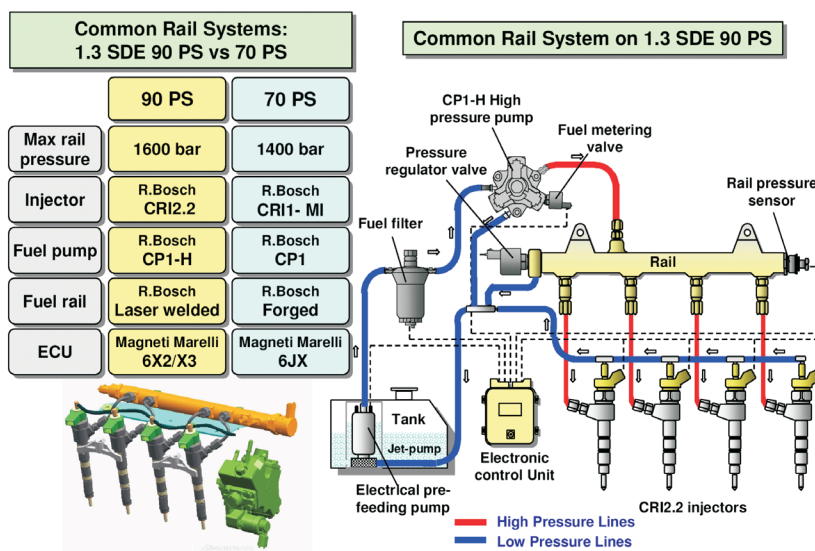
The inlet ducts design has been modified increasing the flow capacity, while accepting a reduction of the swirl level, in order to improve the volumetric efficiency at high speed operation. The combustion bowl design has been modified as well, increasing the bowl diameter and reducing the compression ratio from 18:1 to 17.6 :1.

In order to compensate the negative effects on mixture preparation at low speed due to the swirl reduction, a new nozzle has been adopted, with increased number of holes from 5 to 6, while keeping the nozzle flow rate close to the limit of the technological feasibility, for optimal spray atomization.

5. Fuel injection and EMS

The common rail system of the SDE family is managed by a Magneti Marelli ECU, while the wet components are manufactured by R. Bosch (Fig. 9).

On the 90 PS engine the maximum rail pressure has been increased from 1400 to 1600 bar, through the application of a new cam-driven, high pressure pump, the CP1-H with inlet metering valve (MPROP), while maintaining the pressure regulator (DRV) for precise control of the rail pressure at part load and in cold operation.



Rys. 9. Układ wtryskowy paliwa *common rail*
Fig. 9. Common rail fuel injection system

pompy wysokiego ciśnienia CP1-H, napędzanej od wałka rozrządu, z zaworem dozującym (MPROP). Nie zmieniono regulatora ciśnienia (DRV) służącego do precyzyjnego sterowania ciśnieniem w akumulatorze na obciążeniach częściowych przy pracy na zimnym silniku. Zwiększone ciśnienie pomogło uzyskać żądaną moc przy jednoczesnym zastosowaniu końcówek wtryskiwaczy o małym przepływie bez pogorszenia emisji spalin. Zastosowanie zaworu dozującego na pompie wysokiego ciśnienia pozwoliło na zmniejszenie ilości sprężanego i recykulowanego paliwa przez regulator ciśnienia przy zmniejszeniu zużycia paliwa o ok. 3-4% w cyklu NEDC oraz obniżenie temperatury paliwa w zbiorniku o około 20°C w najgorszych warunkach eksploatacyjnych.

Konstrukcja zaworu wspomagającego wtryskiwacza elektromagnetycznego (rys. 10) została zmieniona tak, aby poprawić dokładność odmierzania wtryskiwanych dawek paliwa z 50% redukcją rozrzutu wielkości wtrysków pilotujących, zachowując jednocześnie pewne cechy poprzedniego rozwiązania, takie jak:

- minimalna przerwa pomiędzy następującymi po sobie dawkami paliwa – 150 μsec ,
- zachowanie liniowe (brak poziomej części charakterystyki dawkowania) w zakresie małych dawek.

Unowocześniony wtryskiwacz elektromagnetyczny firmy R. Bosch o nazwie CRI2.2 zaprojektowany został do pracy przy ciśnieniu 1600 bar, a jego charakterystyka jest w pełni liniowa w całym zakresie mapy wtrysku paliwa dzięki konstrukcji z tzw. wirtualnym wzniosem iglicy (ruch iglicy w wyniku sił bezwładności).

Cechy te pozwalają poprawić precyzję dawkowania paliwa, wykorzystać z dużą różnorodnością koncepcję wtrysku wielopunktowego, zastosować algorytmy stabilizacji wielkości małych dawek paliwa w okresie eksploatacji.

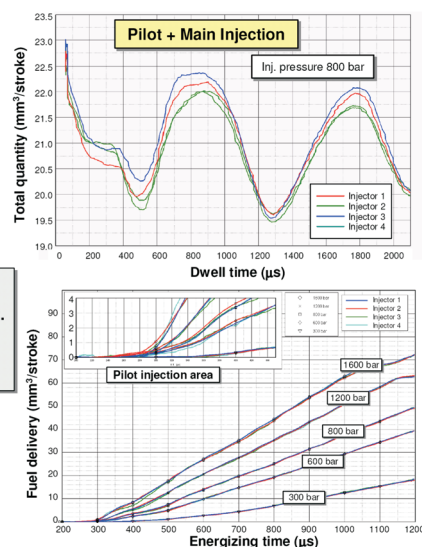
Przy stosowaniu silnika ze zmniejszoną pojemnością skokową w wybranym pojeździe jest dużo trudniejsze spełnienie norm emisji spalin Euro 4 w zakresie emisji NO_x -PM wykorzystując wyłącznie kształtowanie procesu spalania. Dzieje się tak ze względu na to, że silnik pracuje na zwiększonym obciążeniu (p_c) w cyklu jezdnym (większy wskaźnik obciążenia). Mimo znacznej poprawy konstrukcji opisanego powyżej wtryskiwacza przy zastosowaniach w warunkach dużego obciążenia istnieje nadal ryzyko pojawienia się rozrzutów emisji spalin (powtarzalność produkcji) i zróżnicowanej niezawodności.

Aby poprawić dokładność oczyszczania emisji spalin w układzie ECU Magnetti Marelli silnika 1.3 SDE 90 KM zastosowano specjalne funkcje sterowania (rys. 11):

- poprawiono dokładność dawkowania paliwa poprzez ocenę zużycia wtryskiwacza identyfikowaną przez ECU pozwalającą na wyrównanie naturalnego rozrzutu dawkowania między wtryskiwaczami,

New servo-valve design allows the achievement of a 50% improvement of small injected quantity dispersion

• Min injected quantity (300 → 600 bar)	1.0 ± 0.2 mm ³ /st.
• Min dwell time (300 → 1200 bar)	130 μs



Rys. 10. Wtryskiwacz R. Bosch CRI2.2

Fig. 10. R. Bosch CRI2.2 injector

The increased pressure contributed to achieve the power output target with low flow rate nozzles, without compromising the exhaust emissions. The adoption of the inlet metering valve on the high pressure pump allowed the reduction of the amount of fuel pressurized and re-circulated through the pressure regulator, with an improvement of 3-4% of fuel consumption on NEDC driving cycle and a reduction of the fuel temperature in the tank of about 20 deg C in the worst operating conditions.

The servo-valve design of the solenoid injector (Fig. 10) has been revised in order to improve the metering accuracy of the small injected quantities, with a reduction of 50% of the tolerances of pilot injection quantity, while maintaining some key feature of the previous solution, such as:

- min. dwell time between consecutive injections of 150 μsec ,
- linear behavior (no more “plateau”) in the small quantity range.

This updated R. Bosch solenoid injector, named CRI2.2, is designed to operate at 1600 bar and the characteristic is fully linear in the overall fuelling-pressure map, thanks to the “virtual needle lift” design (always ballistic motion of the needle).

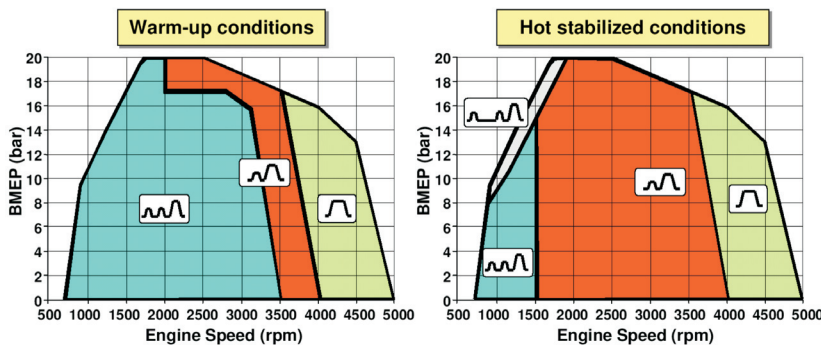
These features allow to improve substantially the fuel metering accuracy, to exploit the concept of multiple injection with high flexibility, to apply algorithms for compensation of the drift of small injections during the life time.

When an engine with reduced displacement is applied on a defined vehicle, it's much more difficult to comply with the NO_x -PM Euro 4 emission standards, relying only on combustion measures, due to the fact the engine is operated at higher BMEP on the driving cycle (higher load factor). In spite of the significant improvements of the injector design described above, on critical applications with high load factors there is still the risk to face emission dispersion issues (conformity of production) and drift in durability (in use compliance).

- rozrzut dawki pilotującej wyrównywany jest przez algorytm, który podczas odcięcia paliwa określa niejednostajność prędkości wału korbowego po aktywacji małych dawek paliwa.
- odchylenia składników EGR (głównie z masowego przepływomierza powietrza) kompensuje się poprzez sondę lambda (UEGO) zainstalowaną w układzie wylotowym silnika za turbiną, która określa rzeczywisty stosunek paliwa do powietrza i wyrównuje różnice.

System *common rail* zastosowany w silniku 1.3 SDE pozwala maksymalnie na 5 „zdarzeń wtryskowych” w czasie cyklu roboczego przy minimalnym czasie przerwy 150 μ sec i minimalnej ilości wtryskiwanego paliwa 1 mm³ na suw, umożliwiając dużą elastyczność w procesie sterowania spalaniem.

W omawianym zastosowaniu wprowadzono sekwencję maksymalnie 3 „zdarzeń wtryskowych” (rys. 12) zmieniając wtryskiwaną ilość paliwa i przerwy wtrysku w zależności od prędkości obrotowej, obciążenia i temperatury płynu



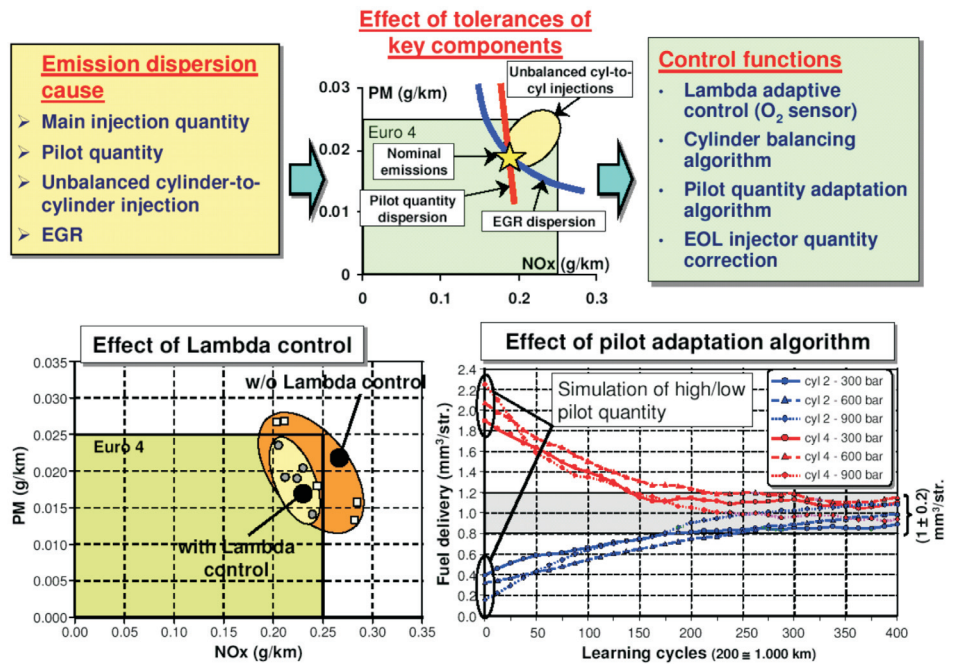
Rys. 12. Sterowanie wtryskiem wielopunktowym podczas normalnej eksploatacji
 Fig. 12. Multiple Injection management in normal operation

chłodzącego tak, aby uzyskać najlepszy kompromis pomiędzy emisją a hałasem powodowanym przez gazy wylotowe przy obciążeniach częściowych, oraz aby uzyskać największy moment obrotowy przy pełnym obciążeniu.

6. Układ doładowania powietrza i układ recyrkulacji spalin EGR

Ważny udział w poprawie osiągnięć silnika 1.3 SDE 90 KM ma system doładowania bazujący na niedużej sprężarce o zmiennej geometrii, produkowanej przez *Borg Warner Turbo Systems* (rys. 13).

System recyrkulacji spalin (EGR) bazuje na elektrycznym zaworze solenoidowym oraz na masowym przepływo-



Rys. 11. Funkcje sterowania dla poprawy skuteczności redukcji emisji spalin
 Fig. 11. Control functions for emission robustness improvement

To improve the emission control robustness, specific control functions have been developed and implemented in the M. Marelli ECU used on the 1.3 SDE 90 PS engine (Fig. 11):

- fuel metering accuracy has been improved through an EOL injector characterization that is identified by the ECU, allowing to compensate the natural dispersion of fuel metering injector by injector.

- dispersion of pilot injection quantity is compensated through an algorithm that during cut off detects the crank speed variation, after activation of small injection quantities.

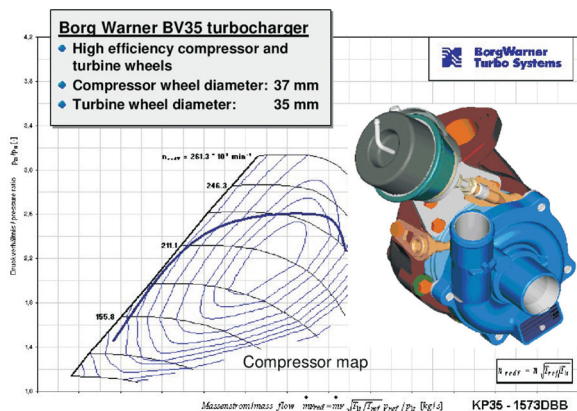
- drift of EGR components (mainly the air flow meter) is compensated through a lambda sensor (UEGO) installed in the exhaust line after the turbine, to detect the actual air-to-fuel ratio and to compensate deviations.

The common rail system applied on the 1.3 SDE engines allows up to 5 injection events/cycle with a minimum dwell time of 150 μ sec and a minimum injected quantity of 1 mm³/stroke, offering a high degree of flexibility in the combustion process management.

In the application activity a sequence of max. 3 injection events has been implemented (Fig. 12), changing the injected quantity and dwell time as a function of rpm, load and coolant temperature, in order to achieve the best compromise between emissions and combustion noise at part load and to maximize the torque output at full load.

6. Air charging system and EGR system

A substantial contribution to the upgraded performances of the 1.3 SDE 90 PS engine was given by the air charging



Rys. 13. Turbina ze zmienną geometrią łopatek kierownicy (charakterystyka przepływową)

Fig. 13. Variable Geometry Turbocharger (VGT)

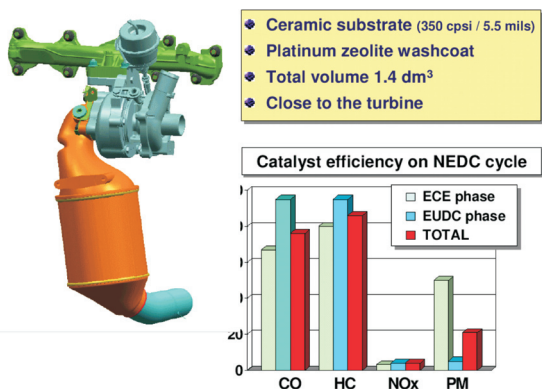
mierzu powietrza działających w pętli sprężenia zwrotnego w celu pełnego spełnienia wymagań precyzyjnego pomiaru przepływającego powietrza w układzie EGR. Ponadto, chłodnica recykulowanych spalin zintegrowana jest z systemem, jak pokazano na rysunku 14.

7. Oczyszczanie spalin

W większości zastosowań wymogi ograniczenia emisji Euro 4 osiągnane są konwencjonalną technologią oczyszczania spalin, opierającą się na zastosowaniu zintegrowanego katalizatora utleniającego 1,4 dm³ (rys. 15), bez potrzeby korzystania z katalizatora znajdującego się pod podłogą pojazdu.

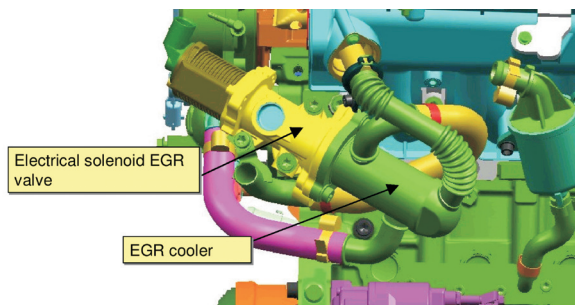
Dla silników spełniających normę Euro 4 przy dużych wskaźnikach obciążenia lub, gdy jest to wymagane ze względów ochrony środowiska, stosuje się system filtra cząstek stałych DPF (rys. 16) złożonym z dwóch elementów: zintegrowanego katalizatora utleniającego i podpodłogowego filtra cząstek stałych z pokryciem katalitycznym, zaprojektowanym do pracy bezobsługowej przez 250.000 km (cały cykl życia silnika).

Całkowita i wydajna regeneracja filtra cząstek stałych (rys. 17) jest zapewniana przez strategię sterowania pozwalającą na:



Rys. 15. Katalizator utleniający zintegrowany z układem wylotowym

Fig. 15. Close-coupled Oxi Cat



Rys. 14. Układ recykulacji spalin – EGR

Fig. 14. EGR system

system, based on a very small variable geometry turbocharger, manufactured by Borg Warner Turbo Systems (Fig. 13)

The EGR system is based on an electrical solenoid valve and on an air flow meter for closed loop control, in order to comply with the demand of precise EGR flow metering. An EGR cooler is moreover integrated in the system as shown in Fig. 14.

7. Exhaust aftertreatment

In most of the applications, Euro 4 emission standards are achieved with conventional aftertreatment technology, based on a close coupled 1.4 L oxidation catalyst (Fig. 15), without the need of underfloor catalyst.

For Euro 4 applications with very high load factors, or if required for environmental protection reasons, a DPF system has been also developed (Fig. 16), based on two elements, a close-coupled oxi cat and an underfloor catalytically coated soot filter, designed to operate maintenance free for 250 000 km (for life).

Complete and efficient regeneration of the DPF (Fig. 17) is guaranteed by a control strategy that allows:

- to increase the exhaust temperature at the inlet of the DPF up to 650 deg C in every operating condition, through exploitation of the flexible multiple injection management capability of the common rail system (# 5 injection events per cycle),
- to activate the regeneration process when the soot limit is achieved, on the basis of a statistical model that detects the mission profile and estimates the soot accumulated in the filter, while a relative pressure sensor is used for diagnosis purpose.

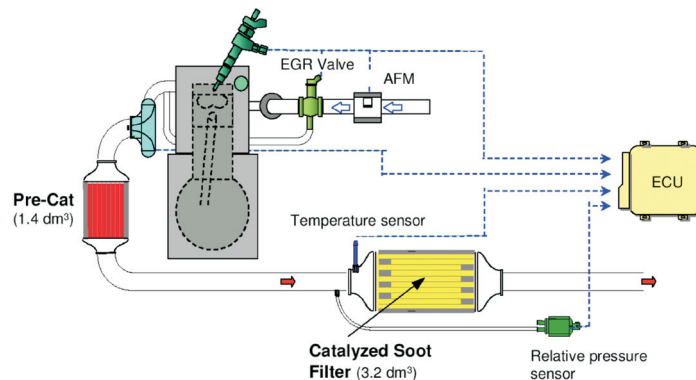


Fig. 16. Diesel Particulate Filter

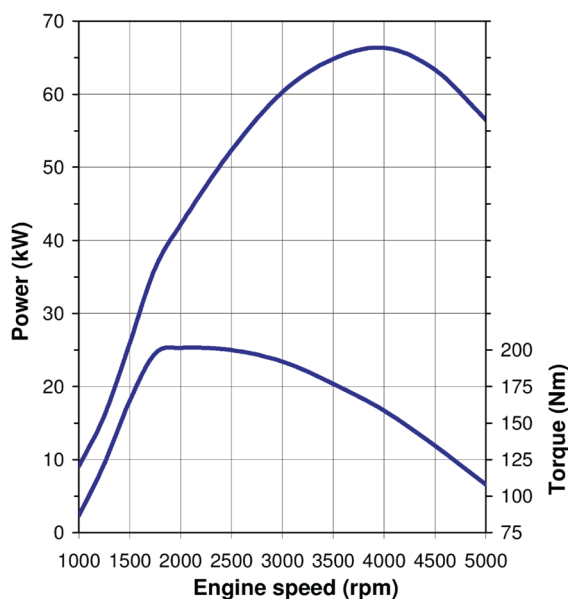
- wzrost temperatury w układzie wylotowym na wejściu do filtra do 650°C w każdych warunkach eksploatacji poprzez wykorzystanie elastyczności sterowania wtryskiem wielofazowym systemu *common rail* (5 zdarzeń wtryskowych na cykl),
- aktywację procesu regeneracji, gdy limit emisji cząstek stałych zostanie osiągnięty, co określa się na podstawie statystycznego modelu wykrywania warunków emisji i umożliwia ocenę ilości zgromadzonych w filtrze cząstek stałych; czujnik ciśnienia względnego wykorzystywany jest do celów diagnostycznych.

8. Maksymalne wskaźniki pracy, zużycie paliwa i emisja toksycznych składników spalin

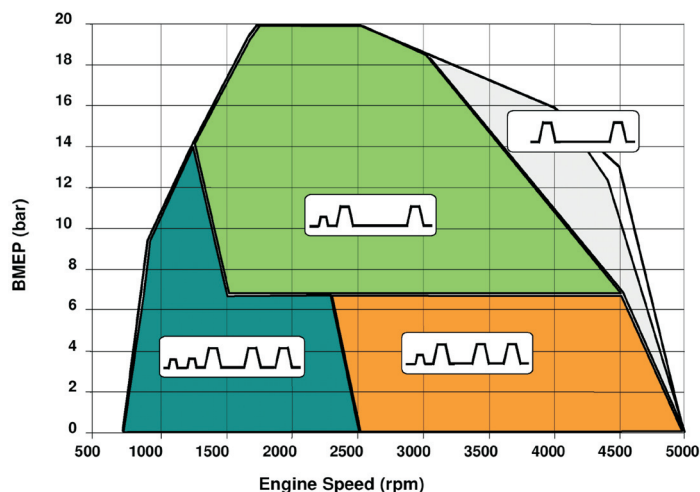
Rysunek 18 pokazuje przebieg zmian wskaźników pracy silnika 1.3 SDE 90 KM na pełnym obciążeniu. Maksymalna moc 66 kW – 90 KM jest już osiągana w zakresie od 3500 do 4000 obr/min, a 86% mocy maksymalnej nadal można osiągnąć przy 5000 obr/min. Maksymalny moment obrotowy 200 N·m osiągany jest przy 1750 obr/min. Jest on jednak ograniczony przez gabaryty bloku silnika, który nie pozwala na skojarzenie go z większymi typami sprzęgła niezbędnego do przenoszenia wyższych momentów obrotowych.

Porównanie z konkurencyjnymi małymi silnikami wysokoprężnymi na rynku samochodów osobowych lokuje silnik 1.3 SDE 90 KM na pozycji najlepszego w swej klasie ze względu na objętościowe wskaźniki mocy i momentu obrotowego (rys. 19).

Jednostkowe zużycie paliwa zmierzone na hamowni przy $n = 2000$ obr/min i $p_e = 2$ bary pokazano na rysunku 20 na obszarze rozrzutu wartości dla różnych silników wysokoprężnych opracowanym na podstawie bazy danych instytutu FEV (Aachen, Niemcy).



Rys. 18. Wskaźniki pracy na charakterystyce pełnej mocy
Fig. 18. Full load performance



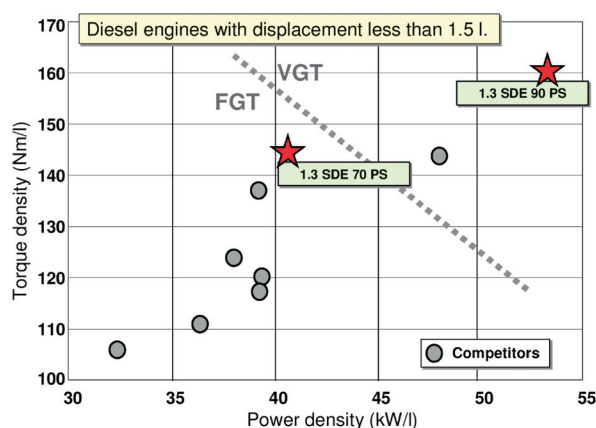
Rys. 17. Sterowanie wtryskiem wielofazowym dla regeneracji filtra cząstek stałych
Fig. 17. Multiple injection management for DPF regeneration

8. Full load performances, fuel consumption and exhaust emissions

Fig. 18 shows the full load performance of the 1.3 SDE 90 PS engine. The maximum power of 66 kW – 90 PS is available from 3500 rpm to 4000 rpm, while 86% of max power is still maintained at 5000 rpm. Max torque of 200 N·m is reached at 1750 rpm, limited by the dimensions of the cylinder block that doesn't allow the adoption of larger clutches, as needed to manage higher torque output.

A comparison with competitors small Diesel engines today in the PC market collocates the 1.3 SDE 90 PS as the best-in-class for power and torque density (Fig. 19)

The engine brake specific fuel consumption (BSFC) at 2000 rpm, 2 bar BMEP is shown in Fig. 20 on a scatter band provided by an FEV data base, related to production Diesel engines.



Rys. 19. Porównanie objętościowych wskaźników mocy (kW/dm³) i momentu obrotowego (N·m/dm³) w klasie silników o pojemności do 1,5 dm³

Fig. 19. Power and torque density vs. competitors

Pomimo małej pojemności skokowej silnika i posiadania cech konstrukcyjnych niezbędnych do uzyskania wysokich wartości objętościowych wskaźników mocy i momentu, sprawność ogólna jest bliska wartościom typowym dla większych silników. Sporo zależy tutaj od dużej wartości stosunku skoku tłoka do średnicy cylindra (sprawność termodynamiczna), zastosowania czterech zaworów na cylinder, turbiny o zmiennej geometrii VGT (straty pompowania) oraz pompy wysokiego ciśnienia CP1-H z zaworem dawkowania (straty bierne).

Osiągnięcie norm emisji Euro 4 bez filtra cząstek stałych uzyskiwane jest w obu segmentach pojazdów B i C (rys. 21). W tych ostatnich zastosowaniach negatywny wpływ dużego obciążenia zlikwidowano poprzez agresywne podejście względem kalibracji systemu i wdrożenie poprawionych funkcji kontroli emisji spalin opisanych wcześniej.

Zastosowanie ceramicznego filtra cząstek stałych o skuteczności filtracji ponad 95% pozwala oczywiście definitywnie pozbyć się problemu emisji tych cząstek.

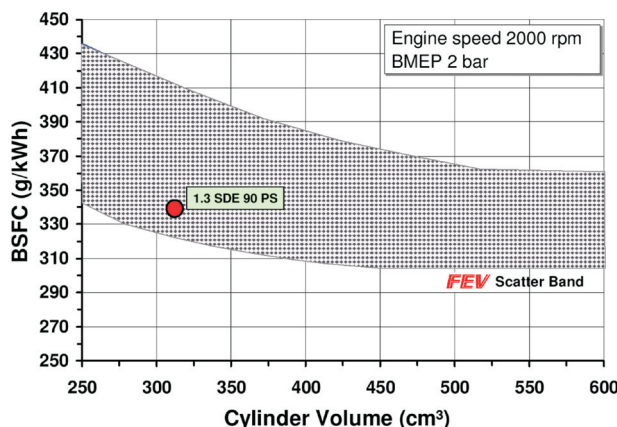
9. Wnioski

Nowy silnik wysokoprężny pracujący w systemie *common rail* spełniający normy emisji spalin Euro 4 został skonstruowany i wprowadzony do produkcji. Silnik ten, charakteryzujący się doskonałym momentem obrotowym i mocą, niskim poziomem emisji spalin oraz dobrymi wynikami w zakresie hałasu, wibracji i twardości pracy stał się wyróżniającą się jednostką w segmencie małych silników wysokoprężnych.

Silnik 1.3 SDE 90 KM można zastosować w pojazdach z segmentu B jako opcję skoncentrowaną na osiągnięciach, a w segmencie C – jako ograniczony gabarytowo silnik dający oszczędności w zakresie zużycia paliwa oraz kosztów eksploatacji.

Dzisiaj silnik ten jest najmniejszym nowoczesnym silnikiem wysokoprężnym w klasie L4 na rynku samochodów osobowych z doskonałymi wartościami objętościowych wskaźników mocy i momentu obrotowego.

Mimo małej pojemności skokowej jednostki i jej ogólnych wymiarów zastosowano tutaj najbardziej zaawansowane technolo-



Rys. 20. Jednostkowe zużycie paliwa (BSFC) w zależności od objętości skokowej jednego cylindra

Fig. 20. Specific fuel consumption vs. cylinder volume

In spite of the small unit displacement and the construction features needed for high power density, the overall efficiency is maintained very close to the figures typical of larger engines. Significant contributions to this result are coming from the high stroke-to-bore ratio (thermo-dynamical efficiency), the adoption of 4 valves per cylinder and VGT (pumping losses), and the CP1-H high pressure pump with inlet metering valve (parasitic losses).

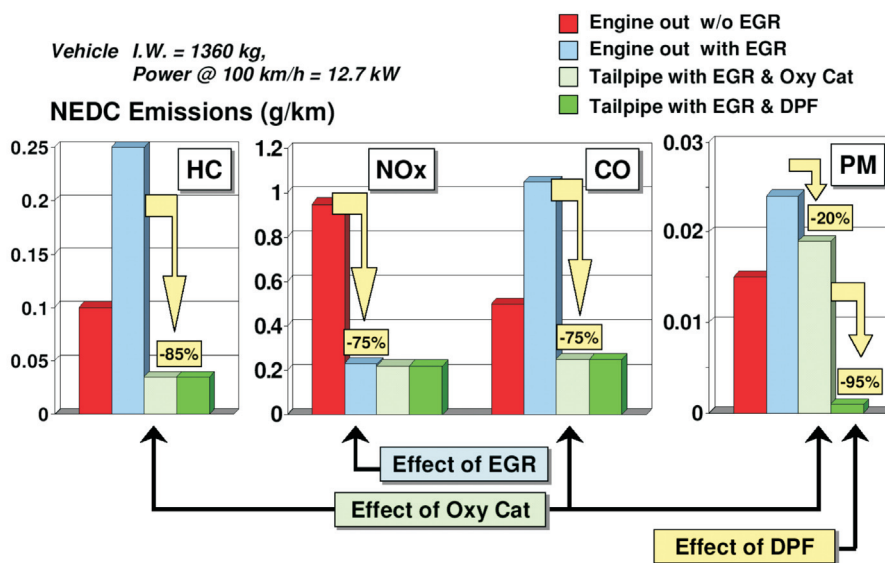
The achievement of Euro 4 emissions standards w/o DPF is obtained both on B segment and C segment vehicle applications (Fig. 21). In these last applications the high load factor penalty on emissions has been overcome through an aggressive calibration approach and the implementation of the robustness improvement control functions previously described.

Of course the application of wall flow ceramic particulate filter, with a filtration efficiency of more than 95%, allows to definitively get rid of the PM emission issue.

9. Conclusions

A new Euro 4 common rail Diesel engine has been developed and industrialized, offering a high feature variant in the small Diesel engine segment, with outstanding power-torque output, low emissions and excellent NVH behavior.

The 1.3 SDE 90 PS engine can be applied on B segment vehicles as an high feature option with main focus on per-



Rys. 21. Emisja w cyklu NEDC

Fig. 21. NEDC emissions

gie i rozwiązania, takie jak: cztery zawory na cylinder, turbosprężarka ze zmienną geometrią łopatek kierownicy, 1600 barów ciśnienia w układzie *common rail* z możliwością wtrysku wielofazowego, zaawansowane funkcje sterowania i bezobsługowy katalitycznie powlekany filtr cząstek stałych, utrzymując jednocześnie koszt produktu na poziomie zadowalającym rynek.

formances or as a downsized value engine on C segment vehicles, with the main focus on fuel economy and cost.

This engine is today the smallest L4 modern Diesel in the PC market, with the highest power and torque density.

In spite of the small unit displacement and overall dimensions, the most sophisticated design and technological features have been implemented, such as 4 valves / cylinder, variable geometry turbocharger, 1600 bar common rail system with multiple injection capability, advanced control functions and maintenance free coated soot filter, while keeping the product cost compatible with a market appeal.

Artykuł recenzowany

Skróty i oznaczenia/Abbreviations and Nomenclature

BSFC	jednostkowe zużycie paliwa/ <i>Brake Specific Fuel Consumption</i>	EOL	czas życia jednostki/ <i>End of Life</i>
DOC	diagnostyka na układach scalonych/ <i>Diagnostics-on-chip</i>	FGT	turbina ze stałą geometrią/ <i>Fixed Geometry Turbocharger</i>
DOHC	podwójny wałek rozrządu w głowicy/ <i>Double Overhead Camshaft</i>	NEDC	nowy europejski test jezdny/ <i>New European Driving Cycle</i>
DPF	filtr cząstek stałych/ <i>Diesel Particle Filter</i>	SOP	początek produkcji/ <i>start of production</i>
ECV	elektroniczna jednostka sterująca/ <i>Electronic Control Unit</i>	VGT	turbina ze zmienną geometrią/ <i>Variable Geometry Turbocharger</i>
EGR	recyrkulacja spalin/ <i>Exhaust Gas Recirculation</i>	ZS	silnik wysokoprężny (o zapłonie samoczynnym)/ <i>Diesel Engine</i>

Literatura/Bibliography

- [1] Morello L., Martinez P.: Fiat High Speed Direct Injection Diesel Engine for Passenger Cars. SAE 894460, 1989.
- [2] Rinolfi R., Imarisio R., Buratti R. – Fiat Research Center: The Potentials of a New Common Rail Diesel Fuel Injection System for the next Generation of DI Diesel Engines. 16. Internationales Wiener Motorensymposium 1995.
- [3] Piccone A. – Fiat Auto, Rinolfi R. – Fiat Research Center: Fiat Third Generation DI Diesel Engines. IMechE – Ricardo Seminar „The Euro 4 Challenge – Future Technologies and Systems”. London, Dec. 3-4, 1997.
- [4] Rinolfi R., Imarisio R. – Fiat Research Center: The Potentials of Third Generation Direct Injection Diesel Engines for Passenger Cars. AVL Congress „Engine and Environment”, Graz, September 1997.
- [5] Ugaglia C., Maiorana G. – Fiat Auto, Rossi Sebastiano G.M. – Fiat Research Center: Die Common-Rail-Motoren von Fiat. MTZ Motortechnische Zeitschrift 59 n. 9, September 1998.
- [6] Imarisio R., Ricco M., Rossi Sebastiano G.M. – Centro Ricerche Fiat: Multiple Injection, a Cost Effective Solution for emission reduction of Common Rail DI Diesel Engines. 9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2000 Aachen, 2000.
- [7] Imarisio R., Giardina Papa P., Siracusa M. – FIAT GM Powertrain: The New FIAT GM Powertrain Small Diesel Engine. 12. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2000 Aachen, 2003.
- [8] Boretto G., Imarisio R., Rellecati P., Barucchi E., Sanguedolce A. – FIAT GM Powertrain: Serial Application of a Catalyzed Particulate Filter on Common Rail DI Diesel Engines for Passenger Cars. Fisita Congress, Barcellona, 2004.
- [9] Ausiello F.P., Serra G., Osbat G., De Cesare M., Zamboni P. – Magneti Marelli Powertrain: Advanced Strategies for Diesel Engine Control. ATA Symposium, Bari, 2004.
- [10] Imarisio R., Peters B., Rossi Sebastiano G.M., Pinson J., Boretto G., Buratti R. – FIAT GM Powertrain: Diesel Strategies Towards Fuel Neutral European Emission Standards. ATA Symposium, Bari, 2004.

Dr inż. Massimo Siracusa – FIAT POWERTRAIN TECHNOLOGIES, Turyn, Włochy.

Mr Massimo Siracusa, Ph.D., M.E. – FIAT POWERTRAIN TECHNOLOGIES, Torino, Italy.

Dr Roberto Imarisio – FIAT POWERTRAIN TECHNOLOGIES, specjalista ds. silników ZS, Turyn, Włochy.

Mr Roberto Imarisio, Ph.D. – FIAT POWERTRAIN TECHNOLOGIES, CI Engines specialist, Torino, Italy.



Dr inż. Paolo Giardina Papa – FIAT POWERTRAIN TECHNOLOGIES, Turyn, Włochy.

Mr Paolo Giardina Papa, Ph.D., M.E. – FIAT POWERTRAIN TECHNOLOGIES, Torino, Italy.