

Günter FRAIDL*
Peter HERZOG

PTNSS-2007-SS1-201

Wielostronne korzyści rozwoju technologii hybrydowych silników o zapłonie iskrowym i samoczynnym

W artykule scharakteryzowano nowoczesne rozwiązania silników o zapłonie iskrowym i samoczynnym. Wymagania stawiane współczesnym silnikom spalinowym są kompromisem między oczekiwaniami klientów, a możliwościami technologicznymi osiągnięcia znacznego zmniejszenia zużycia paliwa i emisji związków toksycznych. Rozwiązania stosowane w silnikach ZI i ZS przyczyniają się do spełnienia tych oczekiwań, a jednocześnie stanowią podstawę badań nad kolejnymi rozwiązaniami. Rozwiązaniami takimi są m.in. napędy hybrydowe, wykorzystujące zalety silników spalinowych (ZI i ZS) i maszyn elektrycznych; napędy takie oferują mniejsze zużycie paliwa, a jednocześnie znacznie podwyższają komfort jazdy.

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, zużycie paliwa, emisja związków szkodliwych

Multiple-benefit technology development for gasoline-diesel-hybrid powertrains

Modern spark ignition and compression ignition engine solutions have been characterized in the paper. The requirements that the modern engines are currently facing are a compromise between the expectations of the clients and the technological capability of obtaining a significant reduction in the fuel consumption and emissions. The solutions applied in the CI and SI engines contribute to the above expectations and constitute a basis for further development i.e. hybrid propulsion combining SI and CI engines with electric machines providing much higher fuel economy and comfort.

Key words: combustion engine, fuel consumption, exhaust emission

1. Wprowadzenie

Postęp w konstrukcji samochodów i ich napędów wymaga wprowadzania do ich produkcji najnowszych technologii. Dzięki zróżnicowaniu rozwiązań możliwa jest poprawa pozycji określonej marki na rozwijającym się rynku. Obecne rozwiązania produkcji pojazdów i napędów (rys. 1) są szczególnie wymagające: cechują się krótkim cyklem produkcyjnym, wyraźnym podziałem zastosowań oraz dużymi oczekiwaniami społeczeństwa i indywidualnych odbiorców.

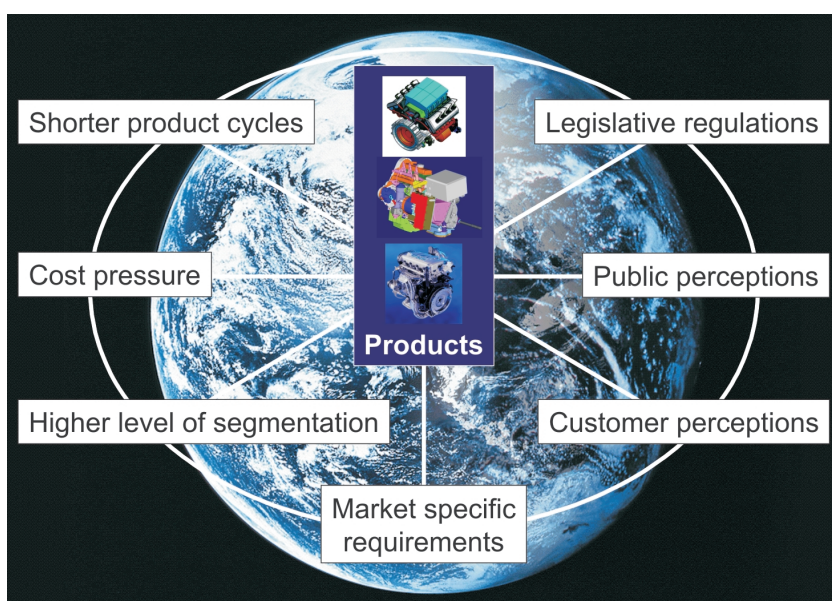
1. Introduction

The development of automobiles and therefore also powertrains has been characterised and driven in the past by the application of the latest technologies. It was thus possible to improve the position of a particular brand in a growth market through strategic differentiation.

Today's market scenario (Fig. 1) with ever-shorter product cycles, more pronounced segmentation, high cost pressure, plus customers' and society's expectations is particularly demanding.

The situation is additionally influenced by more stringent legislation, production over-capacity plus different regional requirements, and therefore requires multiple-benefit technology development. The technologies used have to offer benefits for customers, society, the legislature and manufacturers and must not be used to achieve just one single development goal.

The general challenges to be met in developing a successful powertrain for vehicle application are summarised in Fig. 2. It goes without saying, of course, that the parameters listed above are of different importance in different markets. A typical example is the different positioning of the diesel engine and the gasoline-hybrid in Europe, Japan and the USA.



Rys. 1. Wymagania rynku odnośnie nowych napędów

Fig. 1. Market scenario

Dodatkowe oddziaływanie wywierają przepisy legislacyjne, nadmierne zdolności produkcyjne i odmienne wymagania regionalne, co sprawia, że dąży się do rozwoju technologii spełniających te wielostronne oczekiwania. Stosowane technologie spełniają wymagania klientów, społeczeństwa, ustawodawcy i producentów, i nie mogą być ukierunkowane na spełnienie tylko pojedynczego celu.

Zasadnicze wymagania, jakie powinny być spełnione w procesie rozwoju napędu przeznaczonego do pojazdu przedstawiono na rys. 2. Wymienione parametry mają różne zna-

It must be remembered that, in end effect, the main criterion for the success of a product is the response of the customers and society in general. It must however satisfy all the legal requirements, be reasonably priced and, for clear market positioning, reflect the brand values of the manufacturer. Summing these requirements clearly indicates the difficulties inherent in the task of defining and designing a successful powertrain. Below we therefore look more closely at multiple-benefit technology development of the powertrain using just a few examples. Methodical powertrain development based on an analysis of the market and competition requires a concept to be found within the framework of the brand DNA and the manufacturer's production possibilities, and this is the core competence of established OEM's.

ment based on an analysis of the market and competition requires a concept to be found within the framework of the brand DNA and the manufacturer's production possibilities, and this is the core competence of established OEM's.

2. Core themes of today's powertrain development

2.1 Hybrid technology

The core theme of passenger car powertrain development is the conflicting goal of reducing both fuel consumption (CO_2 emission) and the conventional pollutant emissions (Fig. 3). As mentioned above however (Fig. 2), defined general conditions have to be met relating to costs, market image, driving pleasure, comfort, noise and reliability. Gasoline and diesel engines have completely different positions in the fuel consumption/emissions trade-off. Due to their highly efficient exhaust gas aftertreatment, gasoline engines are clearly emission-oriented. Diesel engines, on the other hand, are heavily consumption-oriented.



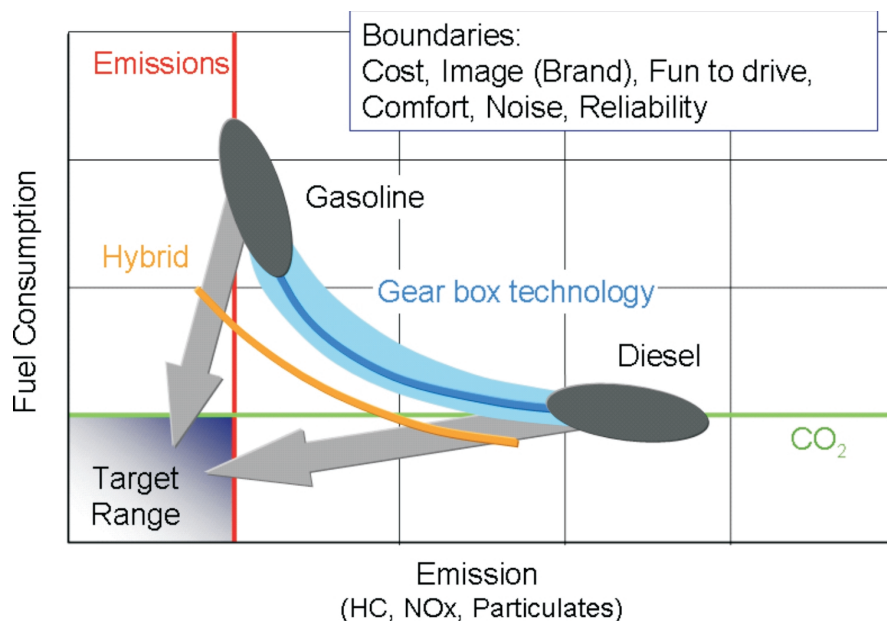
Rys. 2. Czynniki decydujące o sprzedaży napędów

Fig. 2. Challenges for a successful powertrain

czenie w zależności od konkretnego rynku; typowym przykładem może być różne zainteresowanie silnikami o zapłonie samoczynnym i napędami hybrydowymi w Europie, Stanach Zjednoczonych i Japonii.

Podstawowym kryterium sukcesu pozostaje zainteresowanie klientów i społeczeństwa. Produkt musi jednak spełniać również wymagania prawne, mieć przystępną cenę, a dla odróżnienia od innych wyrobów – powinien być odzwierciedleniem filozofii producenta. Podsumowanie tych wymagań wskazuje wyraźne trudności, jakie wiążą się ze zdefiniowaniem i zaprojektowaniem napędu, który ma szansę odnieść sukces rynkowy. Aby to wykazać przeanalizowano rozwój technologii produkcji układów napędowych, gwarantujących sukces. Metodyczny rozwój układu napędowego oparty na analizie rynku i uwzględniający warunki konkurencji, wymaga opra-

ment, gasoline engines are clearly emission-oriented. Diesel engines, on the other hand, are heavily consumption-oriented.



Rys. 3. Główne kierunki rozwoju napędów samochodów osobowych

Fig. 3. Main PC powertrains development directions

cowania odpowiedniej koncepcji w ramach możliwości i specyfikacji producenta, co należy do podstawowych kompetencji producenta finalnego.

2. Zasadnicze kierunki rozwoju współczesnych układów napędowych

2.1. Technologia napędów hybrydowych

Podstawowym problemem rozwoju układów napędowych samochodów osobowych jest jednocześnie zmniejszenie zużycia paliwa (emisji CO_2) i emisji zanieczyszczeń (rys. 3). Jednakże, jak wspomniano wcześniej na rys. 2, sprecyzowane warunki ogólne powinny być spełnione z uwzględnieniem kosztów, wizerunku firmy, przyjemności z jazdy, komfortu, niezawodności oraz ograniczeniem hałasu. Rozpatrując zużycie paliwa i emisję składników toksycznych silniki ZI i ZS mają zdecydowanie różną pozycję. Efektywny system oczyszczania spalin sprawia, że silniki ZI są zdecydowanie ukierunkowane na ochronę środowiska. Natomiast silniki ZS nakierowane są głównie na oszczędność paliwa dzięki dużej sprawności ogólnej i charakterystyce momentu obrotowego. Aby spełnić wymagania ekonomiczne i ekologiczne, konieczne są istotne udoskonalenia silników, uwzględniające ich odmienny charakter pracy. Rozbieżność omawianych charakterystyk może być w pewnym stopniu złagodzona przez odpowiednią konstrukcję przekładni skrzyni biegów, ale nie całkowicie usunięta (rys. 3). Rozwiązanie tego problemu wymaga przekonstruowania całego układu napędowego.

Jedną z możliwości zmniejszenia zużycia paliwa oraz emisji składników toksycznych jest zastosowanie napędu hybrydowego. Z przyczyn ekonomicznych wykorzystuje się obecnie w tym celu silniki benzynowe.

Dla zilustrowania kierunku, w jakim powinny rozwijać się napędy hybrydowe na rys. 4 pokazano symulację wskazującą na możliwości obniżenia emisji CO_2 jako funkcji profilu drogi (cykle jezdne) w zależności od rodzaju napędu. Średnią prędkość jazdy podczas testu wykorzystano jako parametr charakterystyczny dla różnych znormalizowanych testów jezdnych.

Jako podstawowy silnik badawczy wybrano silnik ZI MPI, o pojemności skokowej 2 dm^3 i o zmiennym ruchu ładunku (AVL, System CBR: Controlled Burn Rate). Dodatkowo, obok dwóch odmian hybrydowych tego samego silnika ZI, zaproponowano silnik ZS (bez hybrydyzacji) o podobnej mocy. We wszystkich badaniach wykorzystano silnik spalinowy o takiej samej charakterystyce i jednakowej maksymalnej prędkości wału korbowego. Dodatkowa moc pochodząca od silnika elektrycznego powoduje chwilowe polepszenie właściwości trakcyjnych zespołu hybrydowego i pozwala na zastosowanie silnika spalinowego o mniejszej objętości

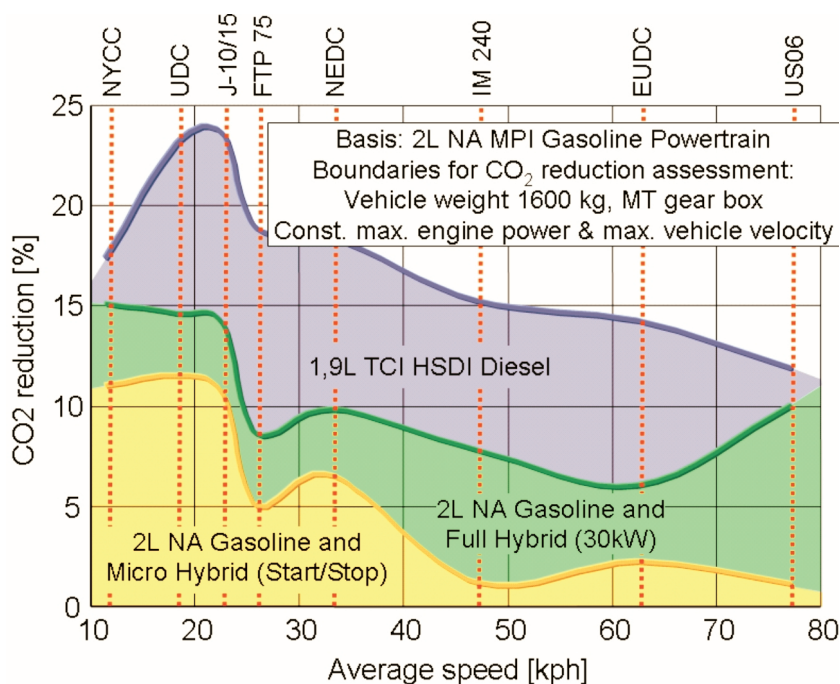
ented due to their thermodynamic efficiency and a torque characteristic which permits a fuel economy oriented transmission ratio. Meeting future fuel and emission requirements will therefore require significant improvements of both engine types, but with clearly different focuses. As shown in Fig. 3, the conflict can indeed be alleviated, but not resolved, by choosing the optimum transmission for the respective application. The main focus of the approach to the solution therefore has to be the complete powertrain.

One option for improving both emissions and fuel consumption is hybridisation. For cost reasons, it is currently only being used in conjunction with gasoline engines.

To illustrate the application focus of hybrid systems, Fig. 4 shows a simulation indicating the potential of reducing CO_2 with various drive concepts as a function of the driving profile (test cycles). The mean test speed is used as a characteristic parameter of the various, standardised test cycles.

A 2.0 l MPI gasoline engine with variable charge motion (AVL CBR System: Controlled Burn Rate) was chosen as the base engine. In addition to two hybrid variants with the same base engine, a diesel engine without hybridisation, but with similar power, was also included. All the variants examined have the same combustion engine power rating and therefore also the same top speed. The additional power available with the electric drive gives the full-hybrid better momentary driving performance and could enable a downsized gasoline engine to be used. The study intentionally ignored this type of concept, however, because of the reserve power is not always available.

Fig. 4 shows clearly that, when compared to the base engine, the fuel economy benefits of the powertrains exam-



Rys. 4. Możliwości zmniejszenia emisji CO_2 w przypadku napędów hybrydowych benzynowych i wysokopreżnych

Fig. 4. CO_2 reduction potentials of gasoline-hybrid & diesel powertrains

skokowej (downsizing). W artykule pominięto taki wariant, bowiem nie zawsze jest osiągnięta większa moc.

Z analizy rysunku 4 wynika, że w porównaniu z silnikiem podstawowym (ZI), korzyści wynikające ze zmniejszonego zużycia paliwa zmniejszają się wraz ze wzrostem średniej prędkości jazdy. W przypadku silnika ZS, główna korzyść wynika z wyższej sprawności przy pracy na obciążeniach częściowych. Nieciągłości w przebiegu krzywych emisji CO_2 w analizowanych testach napędów hybrydowych wynikają z możliwości redukcji emisji CO_2 w warunkach pracy na biegu jałowym (mniejsze zużycie paliwa w cyklu start/stop) oraz średnim opóźnieniu pojazdu (odzysk energii podczas hamowania). Stąd wraz ze wzrostem średniej prędkości w teście zmniejsza się oszczędność emisji CO_2 , wynikająca z pracy na biegu jałowym oraz odzysku energii podczas częstego hamowania.

Stosunkowo niewielkie możliwości zmniejszenia emisji CO_2 przez napęd hybrydowy w cyklu miejskim, ma następujące powody: przy przekroczeniu zapotrzebowania na moc odzysk energii elektrycznej zastępuje siłę hamowania wysprężonego silnika spalinowego. Silniki ZI o dużej pojemności (a szczególnie silniki ZS), wykazują w takich warunkach znacznie większą możliwość redukcji emisji CO_2 aniżeli silnik ZI poddany badaniom. Ponadto, w rozważaniach nie uwzględniono hamowania elektromechanicznego ani elektrohydraulicznego, co oznacza, że podczas każdego konwencjonalnego hamowania nakładało się ono na hamujące działanie maszyny elektrycznej, zmniejszając w ten sposób odzysk energii.

Czynniki mające decydujące znaczenie w określeniu możliwości zmniejszenia emisji CO_2 dzięki zastosowaniu napędu hybrydowego:

- charakterystyka cyklu jezdny,
- różnice w zużyciu paliwa badanych silników,
- specyficzne cechy układu hybrydowego (np. odzysk energii, zmniejszenie silnika).

Cechy te umożliwiają zmniejszenie emisji CO_2 przez napęd hybrydowy, lecz największe możliwości to zmniejszenie zużycia paliwa przez silnik spalinowy oraz zwiększenie udziału odzyskiwanej energii i pracy silnika w warunkach start/stop.

Jednym ze sposobów zmniejszenia emisji przez napęd hybrydowy z silnikiem ZS jest współpraca z maszyną elektryczną (rys. 5). Zmniejsza ona zapotrzebowanie na średnie ciśnienie użyteczne p_e silnika w ciągu testu i umożliwia przesunięcie punktu pracy silnika spalinowego w obszary małej emisji tlenków azotu. Jeżeli odzyskaną energię wykorzystywać do napędu, otrzymuje się dalsze zmniejszenie zu-

życia paliwa. W artykule pominięto taki wariant, bowiem nie zawsze jest osiągnięta większa moc. Z analizy rysunku 4 wynika, że w porównaniu z silnikiem podstawowym (ZI), korzyści wynikające ze zmniejszonego zużycia paliwa zmniejszają się wraz ze wzrostem średniej prędkości jazdy. W przypadku silnika ZS, główna korzyść wynika z wyższej sprawności przy pracy na obciążeniach częściowych. Nieciągłości w przebiegu krzywych emisji CO_2 w analizowanych testach napędów hybrydowych wynikają z możliwości redukcji emisji CO_2 w warunkach pracy na biegu jałowym (mniejsze zużycie paliwa w cyklu start/stop) oraz średnim opóźnieniu pojazdu (odzysk energii podczas hamowania). Stąd wraz ze wzrostem średniej prędkości w teście zmniejsza się oszczędność emisji CO_2 , wynikająca z pracy na biegu jałowym oraz odzysku energii podczas częstego hamowania.

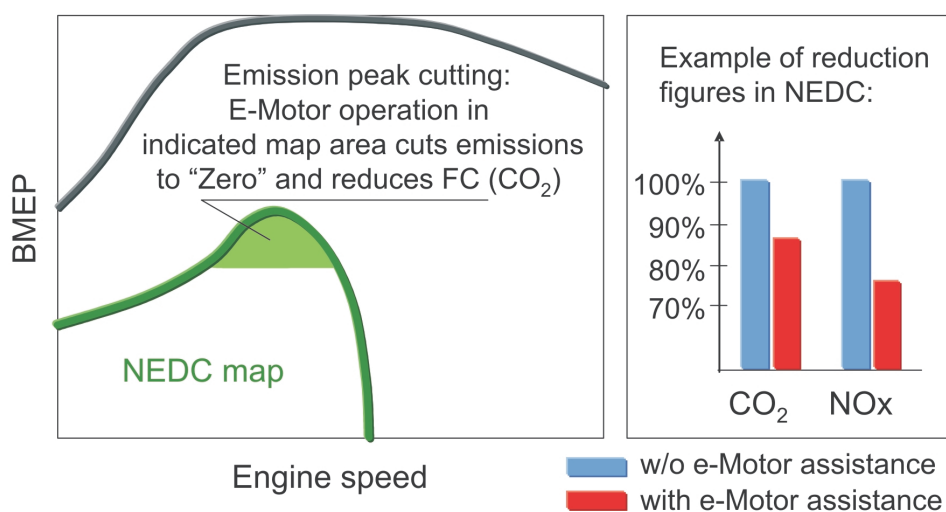
The comparatively low potential offered by hybridisation for reducing CO_2 in the urban cycles can be explained as follows. Under overrun conditions, the electric energy recuperation substitutes for the braking torque of the decoupled combustion engine. Larger capacity gasoline engines and diesel engines especially would then offer significantly higher CO_2 reduction potential compared to the engines studied. Furthermore, neither electro-mechanical nor electro-hydraulic braking were considered in the simulation which means that with each deceleration conventional braking was superimposed on the generator braking of the electric machine, thus reducing the possible recuperation potential.

To summarise, it can be said that the following are decisive in determining the CO_2 reduction potential of the hybrid:

- the specific characteristics of the test cycles,
- the differences in consumption between the combustion engines studied and
- the hybrid's vehicle-specific integration (e.g. recuperation possibilities, engine downsizing).

These help the hybrid to reduce CO_2 , but it is all the more efficient the lower the fuel consumption of the base engine and the higher the proportion of energy recuperation and start/stop operating modes.

One approach for optimising emissions of a diesel hybrid is shown in Fig. 5. The support of the electric machine lowers the maximum IMEP demand on the diesel engine in



Rys. 5. Efekt „obciążenia maksymalnych emisji”

Fig. 5. Effect of “emission peak cutting”

zycia paliwa. W opisanym przykładzie należy spodziewać się redukcji CO_2 o co najmniej 14%, a NO_x o 20%.

Napęd hybrydowy jest więc sposobem na zmniejszenie zużycia paliwa, obniżenie emisji związków szkodliwych i poprawę właściwości trakcyjnych pojazdu. W związku z tym należy go rozpatrywać w relacji: cech kierowcy, zastosowanej technologii i związanych z tym kosztów.

2.2. Silniki o zapłonie samoczynnym

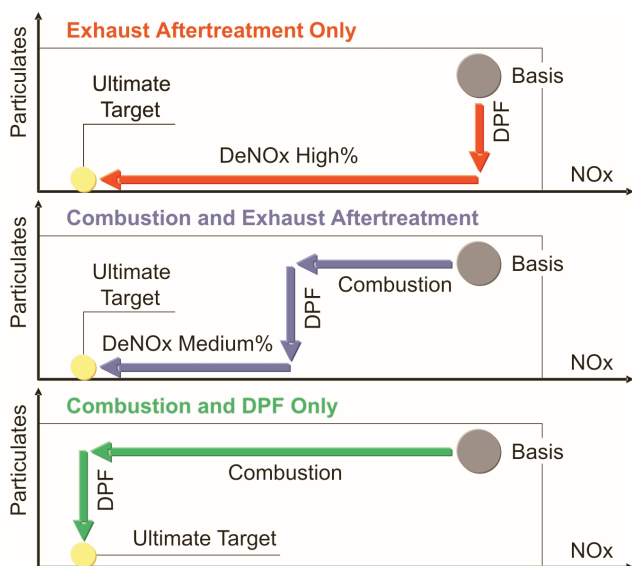
Wyzwaniem i celem rozwoju samochodowych silników ZS jest osiągnięcie możliwie małej wartości emisji; należy ją osiągnąć równolegle do wzrastających wymagań w zakresie osiągnięć, bez zwiększenia zużycia paliwa i przy uzasadnionych nakładach. Emisja związków szkodliwych silnika spalinowego jest wynikiem czynnikiem procesu spalania i szybkości oczyszczania spalin w układzie wylotowym, a działaniem systemu sterowania silnikiem. Na rysunku 6 pokazano schemat możliwości obniżenia emisji spalin. Decyzja, którą z nich wybrać, zależy od dostępności technologii, jej kosztów, uwarunkowań rynkowych (np. unor-

the test cycle (shift in the operating point) and thus enables high NO_x emissions to be avoided in the map range shown. If the recuperated energy is then used to support the drive, an additional reduction in fuel consumption is achieved. In the example described above, approximately 14%/20% reduction in CO_2/NO_x is predicted.

The hybrid drive therefore represents without doubt multiple-benefit technology in terms of fuel consumption, emissions and driving performance, but this has to be considered, however, in relation to the user profile, the technology used and the associated costs.

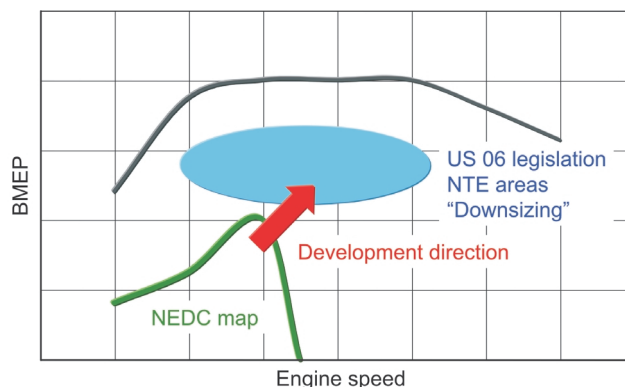
2.2. Diesel engine

The development challenge and goal for passenger car diesel engines is to achieve the lowest possible emissions as shown in Fig. 3. That has to be realised in parallel to continuously increasing performance requirements, and without compromising the better fuel economy and at a justifiable cost. The emission potential of each combustion engine is determined by the combustion process and the conversion rates of the exhaust aftertreatment system, the engine management system (or control) being the integrating component. Fig. 6 is a schematic diagram of possible strategies for



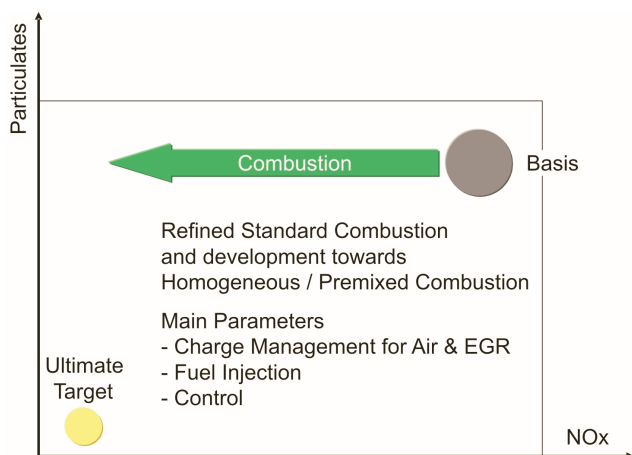
Rys. 6. Przyjęta strategia ograniczania emisji

Fig. 6. Generic emission development strategies



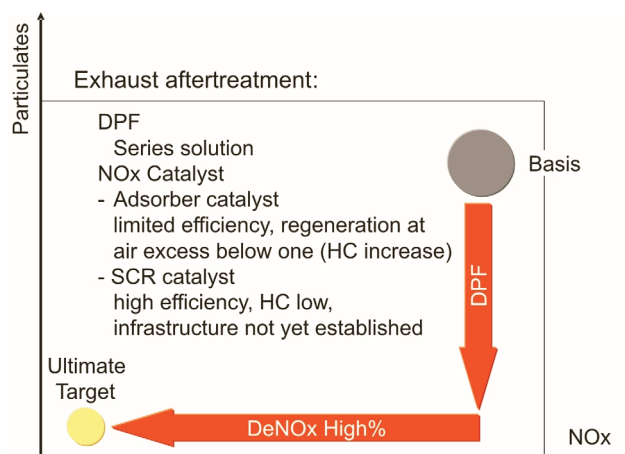
Rys. 7. Wpływ ograniczeń rynkowych na poziom emisji spalin

Fig. 7. Market specific boundaries effects emission challenge



Rys. 8. Przyjęte kierunki rozwoju systemów spalania

Fig. 8. Generic combustion development directions



Rys. 9. Przyjęte kierunki rozwoju systemów oczyszczania spalin

Fig. 9. Generic exhaust aftertreatment development directions

mowań dotyczących zużycia paliwa przez ogół pojazdów, testy jezdne, systemy OBD itd.) oraz możliwości producenta. Możliwości obniżenia emisji w teście jezdnym US06, zakresie emisji NTE (nieprzekraczania wartości) oraz dalszym downsizingu pokazano na rys. 7. Tego typu uwarunkowania wymagają dążenia do większych wartości p_e , co oznacza zmiany w konstrukcji silników ZS i w istotny sposób wpływa na wybór odpowiedniej strategii.

Podstawowy kierunek rozwoju silników pokazano na rys. 8. Zmiany w procesie spalania oraz zastosowanie nowych procesów poprawy spalania wymagają postępu w zakresie przygotowania ładunku, wtrysku i sterowania. W układach

achieving the lowest possible emissions. The decision which of these approaches to use depends on technology availability, its cost and the market-specific environment (e.g. general legislative conditions such as fleet consumption values, test cycles, OBD etc.) plus the manufacturer's capabilities and limitations. This is shown, for example, more closely in Fig. 7 for the US 06 emission cycle, possible NTE emissions ranges (not-to-exceed) and also further downsizing. These kinds of general conditions demand emission control measures in the direction of higher BMEP which represents a tough challenge for diesel engines and significantly affects the strategy to be used.

The general direction in combustion development is shown in Fig. 8. The evolutionary development of today's combustion processes and the use of new processes requires extensive progress in the fields of charge management, injection and control to be made. For exhaust aftertreatment (Fig. 9) the particulate filter is a generally accepted mass-produced element. With NO_x catalysts, the choice of system depends on the conversion rate required, the secondary emissions which occur (e.g. HC), consumption effects (fuel, urea) and the infrastructure required.

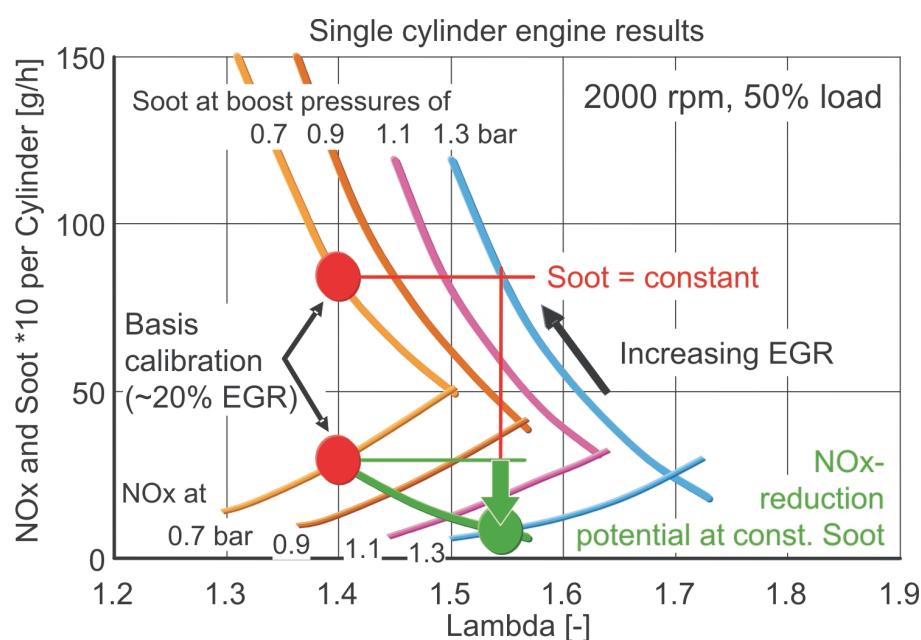
Turbocharging

Fig. 10 shows the trade-off between nitrogen oxide and soot emission over excess air ratio for different boost pressures. The curves represent the mean value of a scatter band produced from the variation of EGR rate with,

in each case, optimised injection parameters. For constant soot emissions, it can be seen that as the boost pressure and EGR rate increase, the nitrogen oxides can be significantly reduced. Assuming real efficiency levels for the turbocharging group, an increase in the excess air ratio of 1.4 to approx. 1.55 is achievable. An increase in the boost pressure at part load has to be seen in conjunction with the full-load requirements, whereby different turbocharging concepts are used depending on the performance and/or low end torque goals. It is obvious, however, that two-stage, continuously controlled turbocharging offers the greatest potential with regard to low end torque and higher specific power output.

The following vehicle-engine combinations – representing challenges for emissions management – were defined for the assessment of driving performance and cycle emissions:

Type of vehicle:	Van,
Reference test weight:	1930 kg,



Rys. 10. Możliwości ograniczenia emisji NO_x przez zwiększenie stopnia doładowania i recyrkulacji spalin

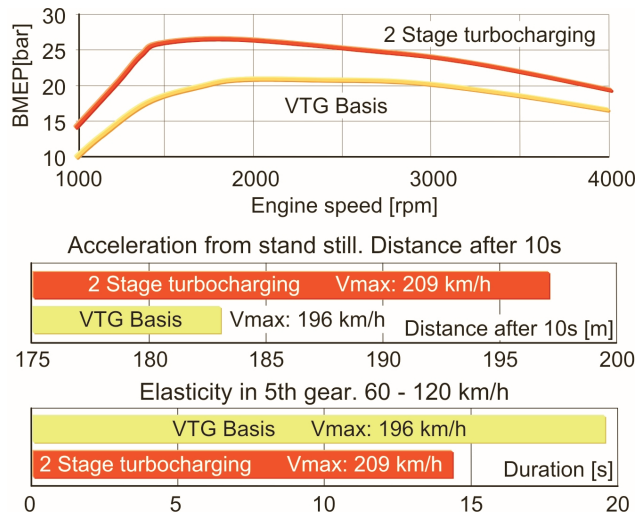
Fig. 10. NO_x reduction potential via higher levels of boosting and EGR-rates

wylotowych powszechnie stosuje się już filtry cząstek stałych (rys. 9), a w przypadku reaktorów katalitycznych do usuwania tlenków azotu wybór systemu zależy od wymaganej szybkości konwersji, wtórnych emisji (np. HC), wielkości zużycia dodatkowych czynników (paliwo, mocznik) oraz wymaganej infrastruktury.

Turbodoładowanie

Związek między współczynnikiem nadmiaru powietrza a emisją tlenków azotu i sadzy dla różnych wartości ciśnienia doładowania pokazano na rys. 10. Krzywe przedstawiają średnią wartość zmian stopnia recyrkulacji spalin (EGR) oraz optymalizowanych, dla każdego przypadku, parametrów wtrysku. Dla stałej wartości emisji sadzy obserwuje się wzrost stopnia doładowania i stopnia EGR, a jednocześnie zmniejsza się zauważalnie emisja NO_x. Zakładając rzeczywisty poziom sprawności zespołu doładowującego, możliwy jest wzrost współczynnika nadmiaru powietrza z 1,4 do ok. 1,55. Wzrost ciśnienia doładowania na obciążeniach częściowych należy uwzględnić w perspektywie warunków

pełnego obciążenia; można bowiem stosować różne sposoby doładowania w zależności od osiągnięć i przewidywanego momentu obrotowego. Jest oczywiste, że dwustopniowe doładowanie o zmieniających się parametrach, stanowi najbardziej obiecujące rozwiązanie zwiększające wartość momentu obrotowego i mocy użytecznej.

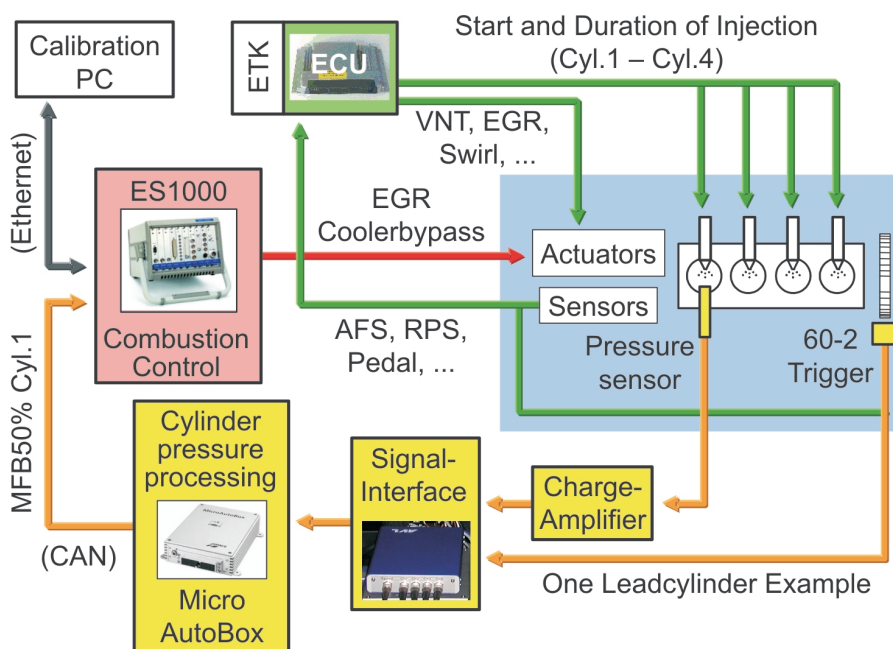


Rys. 11. Osiągi silnika i pojazdu

Fig. 11. Engine and vehicle performance data

Dla osiągnięcia założonych wskaźników pracy i wartości emisji stworzono następujące połączenia silnika i pojazdu:

rodzaj pojazdu: Van,
masa w czasie testu: 1930 kg,
wymagana siła napędowa przy 120 km/h: 900 N,



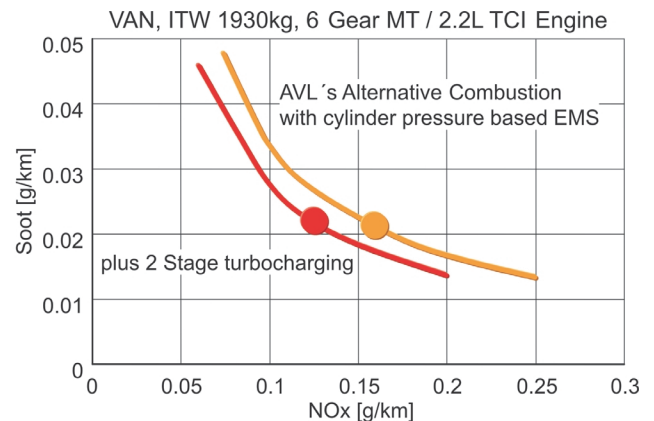
Rys. 13. Środowisko wykorzystujące pomiar ciśnienia w cylindrze do zarządzania pracą silnika

Fig. 13. Cylinder pressure based EMS development environment

Traction power requirement

at 120 km/h: 900 N,
Transmission: 6-gear manual,
Engine capacity: 2.2 L,
Turbocharging group: two-stage, continuously controlled turbocharging.

Driving performance was assessed based on characteristic steady-state full-load values, such as shown on the left of Fig. 11. The distance travelled in 10 seconds from vehicle standstill was used to assess acceleration. With the two-stage



Rys. 12. Symulacja emisji w teście NEDC po zastosowaniu alternatywnego spalania oraz dwustopniowego doładowania

Fig. 12. NEDC emission simulations with alternative combustion and 2 stage turbocharging

concept there is an advantage of about 13 m, as shown top right in Fig. 11. A more significant gain for the two-stage turbocharging was found in elasticity (60 km/h to 120 km/h in fifth gear) – Fig. 11 bottom right. For this very important parameter for real driving, the two-stage turbocharging concept is 27% quicker.

The NEDC emission projections were made with the AVL CRUISE simulation program. Characteristic engine map data which contained values for alternative combustion in the lower load range were used as the basis for both turbocharging concepts. Fig. 12 shows the positive effect of the more powerful turbocharging group on NO_x and soot. A reduction in NO_x of approx. 25% appears to be realistic, further reduction being equally conceivable.

Not only can emissions and driveability be optimised with this concept, but also fuel consumption reduced – depending on the turbocharging strategy used.

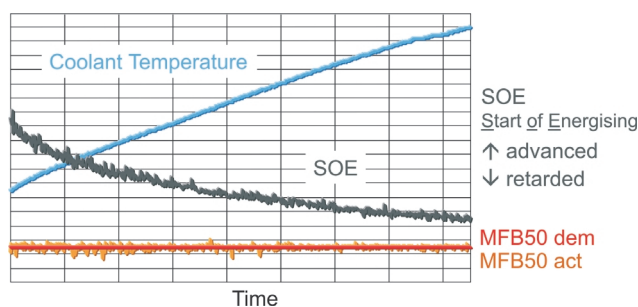
Control and Combustion Process

Fig. 12 shows the potential for emission reduction with the alter-

przekładnia: 6-biegowa, ręczna,
 pojemność skokowa silnika: 2,2 dm³,
 zespół turbosprężarki: dwustopniowy, ze zmiennym
 stopniem doładowania

Właściwości jezdne założono na podstawie wartości zarejestrowanych w warunkach charakterystyki zewnętrznej (rys. 11). Odległość, jaką przejechał pojazd przez pierwsze 10 s po uruchomieniu wykorzystano do określenia wartości przyspieszenia; dzięki zastosowaniu doładowania dwustopniowego uzyskano wynik lepszy o 13 m (rys. 11). Wyraźniejszy zysk w przypadku dwustopniowego doładowania zanotowano, porównując elastyczność (przyspieszenie od 60 do 120 km/h na piątym biegu, rys. 11). Jest to istotny dla właściwości jezdnych parametr – wykorzystanie dwustopniowego doładowania pozwoliło rozpędzić pojazd o 27% szybciej.

Odzworowania emisji spalin zgodnych z testem NEDC wykonano za pomocą programu symulacyjnego AVL CRUISE. Jako odniesienie dwóch wariantów turbodoładowania



Rys. 14. Rozgrzewanie silnika sterowane czujnikiem połowy spalonego paliwa MFB50%

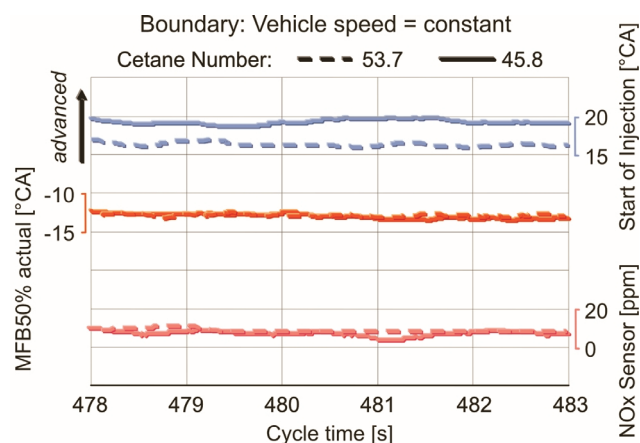
Fig. 14. Engine warm-up with MFB50 controller

wykorzystano dane tworzące mapę wartości alternatywnego spalania w dolnym zakresie obciążeń. Na rysunku 12 pokazano korzystny wpływ zwiększenia doładowania na emisję tlenków azotu i sadzy. Redukcja emisji NO_x o ok. 25% wydaje się możliwa do uzyskania, podobnie jak możliwość jej dalszej redukcji. Koncepcja zmiany doładowania umożliwia nie tylko optymalizację emisji spalin i właściwości jezdnych pojazdu, ale również zmniejszenie zużycia paliwa.

Proces spalania i jego sterowanie

Na rysunku 12 pokazano możliwości ograniczenia emisji dzięki zastosowaniu alternatywnego systemu spalania w silniku ZS opracowanego przez AVL, o którym napisano, np. w [1, 2]. Aby w pełni wykorzystać ten potencjał we wszystkich warunkach pracy silnika, opracowano metodę CYPRESSTM (Cylinder Pressure-based Engine Management System) [3, 4], opartą na pomiarze ciśnienia w cylindrze (rys. 13 – środowisko, w którym działa system sterowania silnikiem). Zadanie polega na obliczeniach parametrów spalania w czasie rzeczywistym algorytmów sterowania. Obliczenia zrealizowano za pomocą programu Matlab/Simulink w celu wyznaczenia parametrów sterowania na podstawie wartości wykresu indykatorowego oraz sygnału czujnika prędkości; wyniki transformowano do

native diesel combustion developed by AVL, about which much has already been written [e.g. 1, 2]. To be able to exploit this potential reliably and reproducibly in all engine operating states, a cylinder pressure-based control concept was developed called CYPRESSTM (Cylinder Pressure-based Engine Management System) [e.g. 3, 4]. The development environment of this EMS is illustrated in Fig. 13. The challenge was the realtime-capable calculation of the necessary algorithms in the EMS. Processes were developed in Matlab/Simulink to determine the control parameters from the cylinder pressure curve and the signal from the standard speed sensor, and implemented in a dSpace MicroAutoBox. These algorithms calculated the indicated mean effective pressure, the crank angle at which 50% of the fuel is converted (MFB50%), the value and position of the cylinder peak pressure (p_{max}) and maximum cylinder pressure rise (MPR). Using the signals from cylinder pressure sensors and the standard speed sensor, the control parameters, MFB50%



Rys. 15. Sterowanie spalaniem z wykorzystaniem parametru MFB50% zmniejsza wrażliwość na zmiany liczby cetanowej

Fig. 15. MFB50% combustion control compensates fuel cetane number variation

and MPR, are available via CAN bus for each cylinder at each combustion event. In the ES1000 system all the algorithms needed to control the alternative combustion are calculated in what is called a software bypass. The results of the algorithms are passed to the EMS via the emulator switch which is also used to load the latest calculation results from the EMS into the ES1000 development hardware. This hardware configuration therefore provides a closed loop for controlling combustion parameters.

The implementation of direct feedback from the combustion process and the availability of information extracted from it not only offers advantages for the use of alternative combustion processes but also opens up other options for improving diesel engine control functions. These are listed below.

Advantages of combustion control:

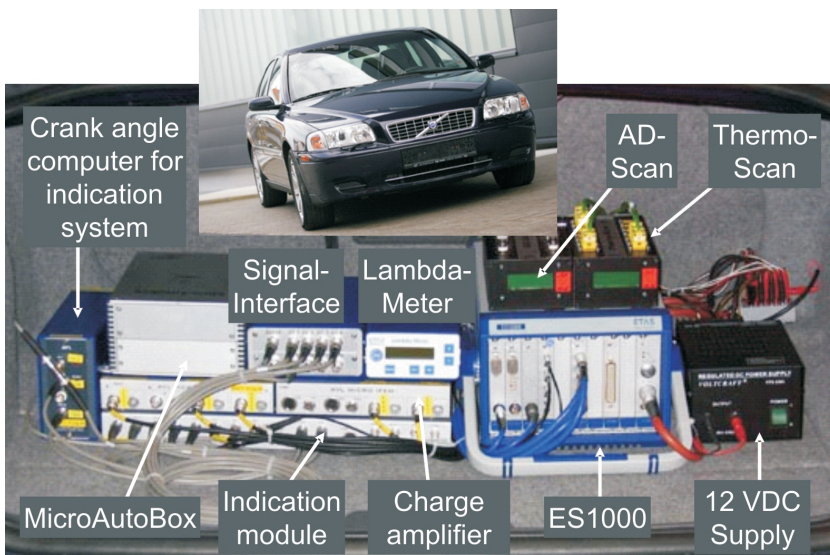
- direct torque measurement and control,
- cylinder-selective control and improved OBD,
- best utilisation of design criteria (e.g. monitoring cylinder peak pressure),

dSpace MicroAutoBox. Według algorytmów można obliczyć średnie ciśnienie indykowane, kąt obrotu wału korbowego dla 50% spalonego paliwa (MFB50%), wartość i położenie katowe maksymalnego ciśnienia w cylindrze (p_{max}) oraz szybkość narastania ciśnienia (MPR). Wykorzystując sygnały czujników ciśnienia w cylindrze i prędkości, są do-

- better long-term stability,
- compensation of production tolerances,
- improved cold start and warm-up,
- compensation for different cetane ratings (e.g. USA/EU),
- use of alternative combustion processes,
- dispensing with or simplification of sensors.

Fig. 14 shows an example of the warm-up of a full engine with predefined MFB50% position. The timing of the energising of the common rail injector (SOE – Start Of Energising) is controlled by comparing the target and the actual MFB50% values. As the coolant temperature increases, the SOE is continuously set later which means that better calibrations for cold start and warm-up can be achieved. Another example is shown in Fig. 15 for fuels with different cetane ratings. Here too, it is clear to see how this controller concept compensates for the changed fuel quality through the start of injection, NO_x emissions thus remaining unchanged. This attribute makes the introduction of diesel engines into the USA easier, for example, where the cetane ratings of fuels on the market are between ~38 and ~60.

At AVL, a Volvo S80 vehicle with a reference mass of 1800kg was chosen to demonstrate alternative combustion pro-



Rys. 16. Pojazd testowy AVL wyposażony w system alternatywnego spalania sterowany z wykorzystaniem sygnału ciśnienia w cylindrze

Fig. 16: AVL's demonstrator with alternative combustion and cylinder pressure based combustion control

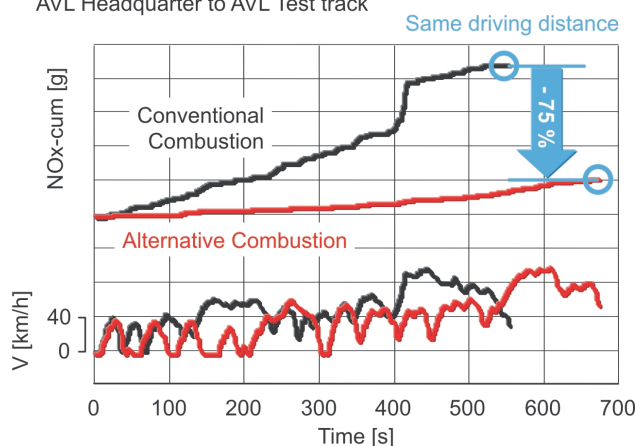
stępne w magistrali CAN dla każdego cylindra w każdym cyklu pracy sygnały obliczone: sterujące, MFB50% oraz MPR. W systemie ES1000 wszystkie algorytmy niezbędne do sterowania alternatywnym procesem spalania są obliczane w trybie programowego obejścia (by-pass). Wyniki obliczeń są przekazywane za pośrednictwem emulatora do układu zarządzającego, który wykorzystywany jest także do przesyłania wyników obliczeń z jednostki sterującej do komputera systemu ES1000. Taka konfiguracja pozwala na uzyskanie sprzężenia zwrotnego sterowaniem parametrami spalania.

Zastosowanie bezpośredniego sprzężenia zwrotnego do sterowania procesem spalania oraz wykorzystanie pochodzących od niego informacji, pozwala wykorzystać zalety zastosowania alternatywnych procesów spalania, ale także stwarza możliwości poprawy funkcji sterowania procesem spalania w silniku ZS.

Zalety sterowania procesem spalania:

- bezpośredni pomiar wartości momentu obrotowego i jego sterowanie,
- sterowanie pojedynczymi cylindrami i usprawniona diagnostyka pokładowa,
- najlepsze wykorzystanie kryteriów projektowania (np. monitorowanie maksymalnego ciśnienia w cylindrze),
- lepsza stabilność długoterminowa,
- kompensacja tolerancji wykonawczych,

AVL's Volvo S80 EmIQ demonstrator vehicle
Real World Driving in Graz / Austria
AVL Headquarter to AVL Test track



Rys. 17. Całkowita emisja NO_x podczas rzeczywistej jazdy; spalanie konwencjonalne w porównaniu z alternatywnym

Fig. 17. Cumulative NO_x emissions in real world driving; alternative vs. conventional combustion

cesses in real driving. This was used in combination with the 2.4 litre capacity Volvo 5-cylinder engine thus providing a representative engine/vehicle configuration. Fig. 16 shows the additional electronic components described above integrated in the demonstration vehicle. The AD-Scan and Ther-

- polepszony zimny rozruch i nagrzewanie silnika,
- kompensacja różnych wartości liczb cetanowych (np. USA/EU),
- zastosowanie alternatywnych procesów spalania,
- brak lub uproszczenie czujników.

Na rysunku 14 pokazano rozgrzewanie silnika ze wstępnie określonym położeniem punktu MFB50%. Otwarcie wtryskiwacza układu common rail (SOE – *Start of energizing*) jest sterowane przez porównanie docelowej i chwilowej wartości MFB50%. Ze wzrostem temperatury cieczy chłodzącej następuje opóźnienie SOE, co oznacza, że możliwe jest uzyskanie lepszych parametrów sterowania podczas zimnego rozruchu i procesu rozgrzewania. Inny przykład dla paliw o różnej liczbie cetanowej, pokazano na rys. 15. Zaprezentowano ideę sterowania kompensując jakości paliwa przez odpowiedni początek wtrysku, przy niezmienniej emisji NO_x . Ta cecha pozwala łatwiej wprowadzić silniki wysokoprężne na rynek amerykański, na którym liczba cetanowa paliw znajdujących się w sprzedaży zawiera się w zakresie 38–60.

Do badań alternatywnego procesu spalania podczas rzeczywistej jazdy wybrano w firmie AVL samochód Volvo S80 o masie własnej 1800 kg. Wyposażono go w 5-cylindrowy silnik Volvo o zapłonie samoczynnym o pojemności skokowej 2,4 dm³. Na rysunku 16 pokazano dodatkowe elementy wyposażenia elektronicznego zastosowane w tym pojeździe. Systemy AD-Scan i Thermo-Scan użyto w celu zapisywania zmiennego ciśnienia i temperatury w cylindrze. Wartość współczynnika nadmiaru powietrza mierzono za pomocą sondy λ ; nie była ona wykorzystywana do sterowania pracą silnika, a dostarczała jedynie informacji nt. optymalizacji emisji w stanach przejściowych.

Aby wykazać zmniejszenie emisji NO_x zastosowano alternatywny system spalania i układ sterowania wykorzystujący pomiar ciśnienia w cylindrze. Na rysunku 17 pokazano całkowitą emisję tlenków azotu podczas rzeczywistej jazdy, w porównaniu z emisją przy spalaniu konwencjonalnym. Wyniki zależą także od sposobu jazdy i sytuacji drogowych; na rysunku zaprezentowano je dla typowych warunków jazdy, gdy pojazd przyspiesza przez 400 s – obserwowany jest wtedy wyraźny wzrost emisji tlenków azotu.

Korzyści w ograniczeniu emisji tlenków azotu z zastosowaniem opisanej koncepcji sterowania wynikają z maksymalnego wykorzystania procesu spalania, dużej dokładności parametrów silnika oraz paliwa, a także – zależnie od jakości wykonania czujnika ciśnienia w cylindrze – wykorzystują zdecydowanie mniejszą liczbę nieskomplikowanych czujników.

2.3. Silniki o zapłonie iskrowym

W przypadku wszystkich współcześnie produkowanych silników ZI standardem jest stosowanie reaktora katalizacyjnego potrójnego działania, do usuwania wszystkich związków szkodliwych przewidzianych normami. Dzięki niemu mogą być spełnione wszystkie, nawet najostrzejsze normy emisji, w skrajnym przypadku przy zwiększonych kosztach.

mo-Scan are only used for recording various system pressures and temperatures. The lambda value measured by lambda meter is not used for control purposes but is purely additional information for the transient emission optimisation.

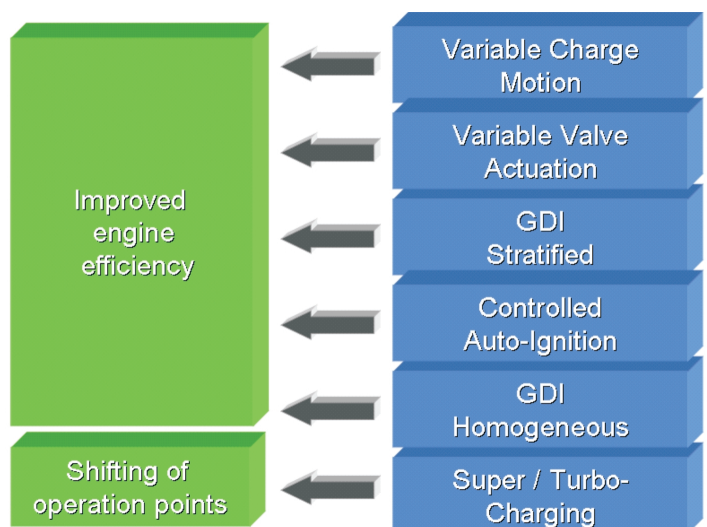
To provide an impression of the NO_x reduction possible with alternative combustion and cylinder pressure controlled EMS, Fig. 17 shows accumulative emissions in real driving compared to those of a conventional combustion process. It must be remembered, however, that different driving styles and changed traffic situations affect the result. This is demonstrated clearly, for example, under conventional driving conditions at about 400 s in acceleration mode where a significant increase in NO_x occurs.

The multiple benefits of the control concept described above lie in achieving the lowest possible emissions by exploiting combustion and application limits, in compensating for engine and fuel tolerances and, depending on the quality of the cylinder pressure sensor, in the system control and diagnostics with significantly fewer and simpler sensors.

2.3. Gasoline engine

With the three-way catalyst, a highly effective exhaust aftertreatment for all restricted pollutant components is already a mass-produced standard for gasoline engines. Even the lowest emissions limits can be met with it – at least with the appropriate technical investment. The greatest development challenge for gasoline engines is therefore not emissions but reducing fuel consumption while providing greater driving pleasure, see Fig. 3. Since gasoline engines are very often the less expensive choice for a first-time car, the cost aspect carries more weight than for diesel engines.

If we consider the lower fuel economy compared to diesel engines on a volumetric basis, about a third is the result of lower fuel density, another third is due to the overall vehicle gearing which is shorter for gasoline engines than for turbocharged diesel engines – and therefore results in a much



Rys. 18. Sposoby obniżenia zużycia paliwa w silniku benzynowym

Fig. 18. Key gasoline engine technologies for improved fuel economy

Największym więc wyzwaniem wobec silników benzynowych nie są już wartości emisji, ale ograniczenie zużycia paliwa bez rezygnowania z komfortu jazdy (por. rys. 3). Jako że silnik benzynowy jest najczęściej wybierany w przypadku taniego pierwszego auta, aspekt ekonomiczny jest istotniejszy niż w przypadku silnika ZS.

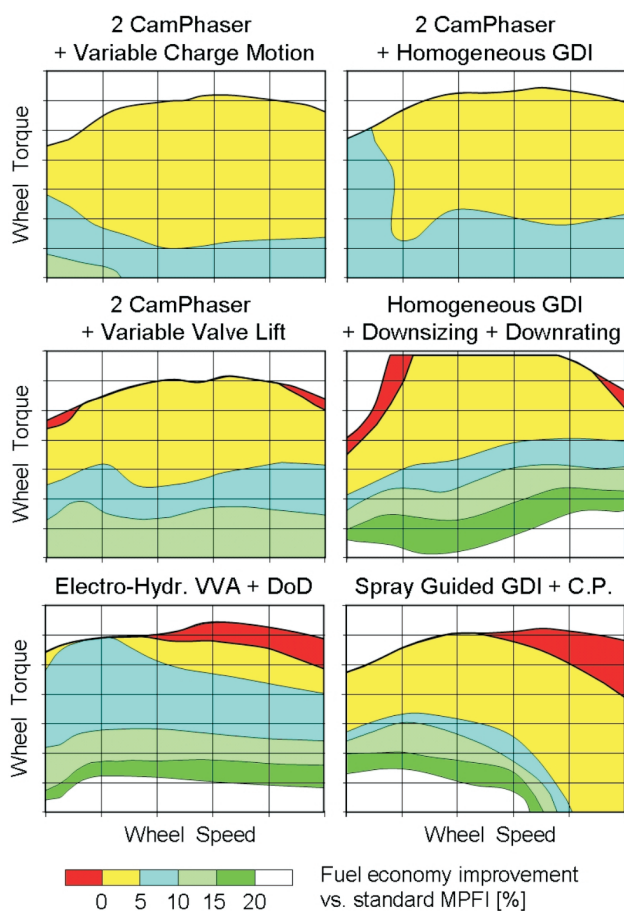
Jeśli porównuje się wyższe w porównaniu z silnikiem ZS, objętościowe zużycie paliwa, to ok. 1/3 pochodzi z mniejszej gęstości paliwa, następna 1/3 jest związana z systemem zmiany biegów, krótszych dla silnika ZI niż turbodoładowanego ZS, a ostatnia 1/3 wynika ze strat cieplnych. W przeszłości rozwój silników benzynowych koncentrował się na termodynamice (np. wtrysk bezpośredni i uwarstwienie ładunku, sterowanie silnikiem bez przepustnicy), lecz niewiele zajmowano się przesunięciem punktów pracy silnika, w obszary o mniejszym zużyciu paliwa.

Odmienne niż w silniku ZS, gdzie podstawowe technologie są rozwiązaniami standardowymi (np. wtrysk bezpośredni, turbodoładowanie), sposoby obniżenia zużycia paliwa w silnikach ZI są inne i różnią się między sobą zarówno kosztami, jak i sprawnością (rys. 18). Możliwości obniżenia zużycia paliwa w stosunku do typowego masowo produkowanego silnika (4 zawory na cylinder, $\lambda = 1$, niezmiennie

lower engine load distribution, and only about a third results from the thermodynamics. In the past, advanced development of gasoline engines concentrated primarily on the thermodynamics (e.g. DI stratified concepts, throttle-“free“ load control), but very little in the direction of operating load point shift.

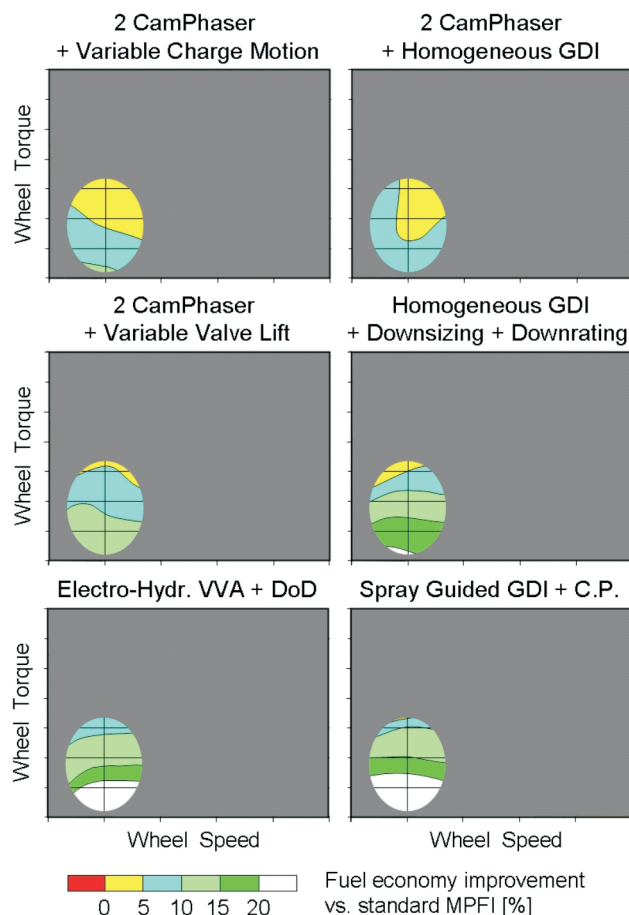
Unlike diesel engines, for which at least the basic technologies (e.g. direct injection, turbocharging) are largely standard, the technologies used to reduce fuel consumption in gasoline engines are diverse, Fig. 18, and differ both in terms of cost and effort as well as efficiency. The potential for better fuel consumption offered by these technologies compared with a simple base status of today's mass-produced engines (4-valve, $\lambda = 1$, fixed valve events) depends not only on the steady-state consumption, Fig. 19, but is heavily dependent on the customer-relevant operating modes.

Although the combination of camshaft phasing and variable charge motion at low loads shows only comparatively moderate fuel consumption improvement, it nevertheless produces no consumption disadvantages in any other operating mode compared to the base status. Direct-injection stratified concepts on the other hand show a markedly differentiated consumption behaviour. Significantly better fuel



Rys. 19. Zmniejszenie zużycia paliwa uzyskane po zastosowaniu różnych technologii w silniku ZI

Fig. 19. Fuel economy improvement of key gasoline engine technologies



Rys. 20. Zmniejszenie zużycia paliwa przez poprawę rozkładu obciążeń przy małej prędkości i częściowym obciążeniu

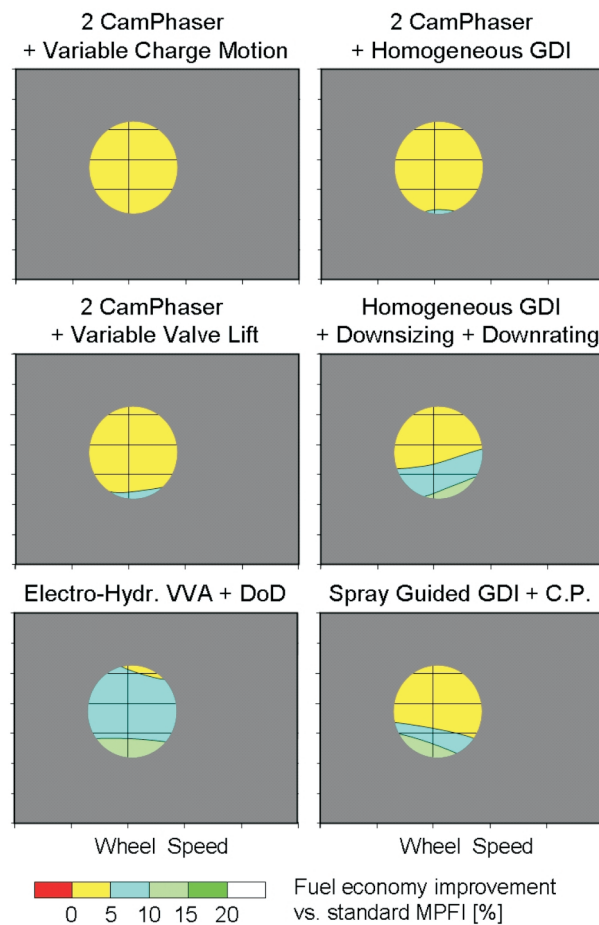
Fig. 20. Fuel economy improvement load distribution at low load & speed

ustawienie rozrządu) zależą nie tylko od zużycia w warunkach ustalonych, ale w sposób istotny od przyzwyczajenia kierowcy (rys. 19).

Zastosowanie zmiennych faz rozrządu i zmiennego ruchu ładunku na obciążeniach częściowych powoduje umiarkowany spadek zużycia paliwa w porównaniu z rozwiązaniem podstawowym, to jednak nie powoduje ujemnych skutków w żadnym trybie pracy. Z kolei uwarstwienie ładunku i wtrysk bezpośredni odznaczają się wyraźnie zróżnicowanym zużyciem paliwa. Zdecydowane zmniejszenie zużycia obserwuje się na obciążeniach częściowych, a małą sprawność w warunkach znamionowych. Zjawisko to uległo znacznej poprawie wraz z zastąpieniem przysięciennego zawirowania ładunku, spalaniem kształtowanym strumieniem rozpylonego paliwa, tym niemniej główna wada systemu pozostała. Zastosowanie zaworów o zmiennym wzniosie jest kompromisem między wymienionymi systemami. Oszczędności paliwa z zastosowaniem zmiennego wzniosu zaworów na obciążeniach częściowych są mniejsze niż w przypadku ładunku uwarstwowionego, lecz w warunkach znamionowych nie ma ograniczeń, wynikających z działania reaktora DeNOx. Wyraźnie mniejsze zużycie paliwa w całym zakresie pracy można osiągnąć łącząc koncepcję zmniejszenia wymiarów i osiągnięć silnika (downsizing/downrating) z wtryskiem bezpośrednim, zmiennymi fazami rozrządu i turbodoładowaniem. W warunkach pełnego obciążenia, nawet ze zmniejszoną prędkością obrotową, zużycie paliwa można utrzymać na takim poziomie jak dla silnika bez doładowania. Rozwiązaniem wpływającym na zmniejszenie zużycia paliwa nie tylko na obciążeniach częściowych, ale również w zakresie średnich i dużych obciążeń, jest zastosowanie rozrządu bezkrzywkowego – elektrohydraulicznego.

Korzyści wynikające ze zmniejszenia zużycia paliwa uzyskuje się głównie dzięki odpowiedniemu zaprojektowaniu trasy przejazdu, co jest również związane z pojemnością skokową silnika, przełożeniem przekładni i masą pojazdu. Jakkolwiek istotna próba zmiany technologii nie może ograniczać się tylko do silnika (typowy przykład: zmniejszenie g_e na typowym obciążeniu częściowym: $n = 2000$ obr/min i $p_e = 2$ bar), ale musi opierać się na kompletnym przeprojektowaniu silnika, skrzyni biegów i pojazdu z uwzględnieniem warunków brzegowych. Są nimi zależność między zużyciem paliwa w teście NEDC, a eksploatacją rzeczywistą, przyjemność z jazdy, lub koszty ograniczania emisji. Jeżeli podczas przejazdu wykorzystuje się głównie pracę silnika w dolnym zakresie obciążeń (rys. 20), jako najefektywniejsze sposoby ograniczenia zużycia paliwa wymienić można: spalanie ładunku uwarstwowionego, bezkrzywkowy napęd zaworów (elektrohydrauliczny z wyłączaniem pracy cylindrów), jak również downsizing/downrating.

Wraz ze zmianą profilu drogi, czyli zmianą warunków pracy silnika w kierunku większych obciążeń, zmieniają się istotnie poprzednie relacje (np. stosunkowo mały silnik w ciężkim samochodzie lub schemat przełożeń nastawiony na zmniejszenie zużycia paliwa). Uzyskane różnice w wartościach zużycia paliwa przez zastosowanie innych rozwią-



Rys. 21. Obniżenie zużycia paliwa przez zmianę profilu obciążenia przy dużej prędkości i zwiększonym obciążeniu

Fig. 21. Fuel economy improvement load distribution at higher load & speed

consumption in the stratified range contrasts with the lower efficiency in the high load/speed range. Although this behaviour was decisively improved by the change from wall-/turbulence-guided combustion processes to spray-guided combustion, the main disadvantage still remains. The behaviour of the infinitely variable mechanical valve lift lies between that of the two systems mentioned above. The consumption improvements in the low load range are smaller than with stratified charge concepts, but there are no restrictions in the higher load/speed range due to a DeNOx catalyst. Combined downsizing/downrating concepts based on direct injection, camshaft phasing and turbocharging with the appropriate system layout show significantly better fuel consumption over virtually the entire customer-relevant operating range. Even in the range close to full load, fuel consumption can, with reduced nominal speed, be kept at the level of a naturally aspirated engine. Camless, fully variable electro-hydraulic valve timing offers significant fuel consumption advantages not only at low loads (incl. cylinder cut-off) but also at middle and high loads.

The customer-relevant real world fuel economy benefits which can actually be realised depend heavily on the load profile and thus the combination engine displacement, trans-

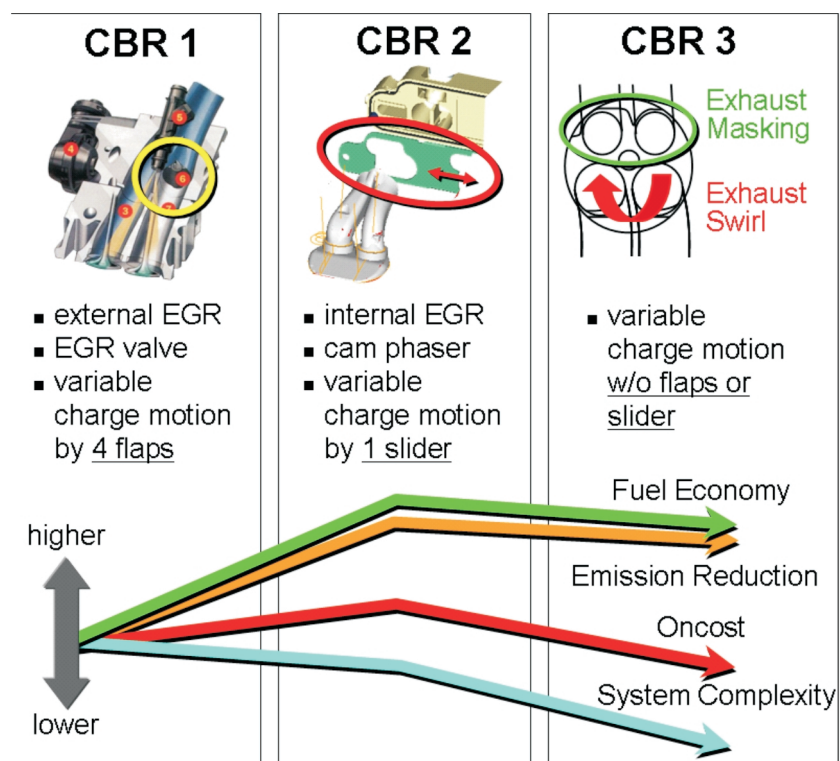
zań stają się mniejsze. Ze względu na niski koszt, obiecujące jest rozwiązanie w postaci połączenia zmiennych faz rozrządu ze zmiennym ruchem ładunku. Z kolei spalanie ładunku uwarstwionego cechuje się gorszym stosunkiem efektu do poniesionego kosztu. Spośród kosztownych sposobów ograniczania zużycia największe możliwości tkwią w mechanizmie elektrohydraulicznym napędu zaworów. Koncepcja downsizingu/downratingu charakteryzuje się także bardzo dobrym stosunkiem uzyskanego zmniejszenia zużycia paliwa, zwiększonego zadowolenia z jazdy oraz większego kosztu, również przy większych obciążeniach.

mission, and vehicle weight. Any meaningful assessment of the technology cannot therefore be based purely on the engine (a typical example being: BSFC improvement at the typical part load reference point 2000 rpm – 2 bar), but can only be based on a total evaluation of engine, transmission and vehicle taking into account peripheral conditions, such as trade-off between NEDC/customer fuel consumption, driving pleasure and emission-control costs.

If the load profile is mainly at low engine loads, Fig. 20, it is primarily stratified charge concepts, camshaft-less valve timing (electro-hydraulic with cylinder cut-off) as well as

downsizing/downrating concepts which prove to be the most effective fuel consumption technologies.

Significantly changed relationships occur when the load profile is shifted towards higher loads (e.g. a small engine capacity with comparatively heavy vehicle and/or consumption-oriented transmission layout), Fig. 21. The differences in consumption between the various technologies are then less significant. Due to the relatively low additional system costs, here the combination of camshaft phasing plus variable charge motion becomes highly attractive. Stratified charge concepts on the other hand show a less favourable benefit/cost ratio. Of the costly consumption technologies, the electro-hydraulic camshaft-less valve timing shows the greatest potential for improvement and from which an attractive cost efficiency can be expected. Downsizing/downrating concepts also show a very good ratio between reduced fuel consumption, increased fun to drive and additional system



Rys. 22. Zmienny ruch ładunku – możliwością zmniejszenia zużycia paliwa

Fig. 22. Variable charge motion – continuous evolution for increasing customer value

Z punktu widzenia wielokierunkowych efektów istotne są takie rozwiązania technologiczne, które nie tylko gwarantują najlepszy możliwy stosunek zmniejszonego zużycia paliwa do poniesionych kosztów, ale takie które jednocześnie zapewniają efekt synergii. Można tu wymienić:

- zmniejszenie kosztu nowych technologii bez uszczerbku dla funkcjonalności,
- wzrost efektywności (sprawności) przy niezmiennym koszcie.

Zmienny ruch ładunku

Zmienny ruch ładunku pierwszej generacji opracowany w AVL pod nazwą CBR (Controlled Burn Rate) (rys. 22), wszedł do produkcji masowej w 2002 r. Głównym celem było zmniejszenie zużycia paliwa na obciążeniach częściowych, dzięki poprawie stabilności spalania i przez to większej tolerancji na stopień recyrkulacji spalin. Oprócz zmniejszenia zużycia paliwa o 4–5% zarówno w teście NEDC, jak w testach drogowych, osiągnięto dodatkowe korzyści: m.in.

costs, also with higher load profiles.

Above all, of interest in terms of an effective multiple-benefit orientation are the technology elements that offer not only the best possible ratio between reduced consumption and additional costs, but also additional synergy effects. These can be used either:

- to reduce the technology cost while retaining the same functionality,
- to increase the efficiency at the same technology cost.

Variable charge motion

The first generation of a variable charge motion system developed by AVL (CBR – Controlled Burn Rate), Fig. 22 left, has been in mass production since 2002. The original target was to reduce the fuel consumption at part load by means of significantly improved combustion stability and therefore higher EGR tolerance. Apart from improved consumption of about 4-5% both in the NEDC test and in real customer driving, there is also additional added value from

zwiększoną tolerancję na opóźnienie zapłonu i wynikającą stąd lepszą strategię rozgrzewania reaktora katalitycznego, które powodowały zmniejszenie emisji spalin. W związku z tym niepotrzebny był dodatkowy system kształtowania strumienia powietrza, a pokrycie reaktora katalitycznego metalami szlachetnymi mogło ulec zmniejszeniu (redukcja kosztów).

Zewnętrzna recyrkulacja spalin do kolektora dolotowego wymaga odpowiedniej konstrukcji przewodów oraz – dla lepszych właściwości dynamicznych – systemu indywidualnego rozdziału do cylindrów. Systemy takie wymagają ponadto szczególnej uwagi odnośnie odporności na zanieczyszczenia. Na rysunku 22 (część środkowa) pokazano system EGR drugiej generacji, polegający na wewnętrznej recyrkulacji z wykorzystaniem układu zmiennych faz rozrządu. Wykorzystując odpowiednią możliwość zmniejsza się niebezpieczeństwo zanieczyszczenia kolektora dolotowego. Pojedynczy zawór ze współpracującym mechanizmem można zastąpić znacznie tańszym suwakiem plastikowym, który może być zastosowany w systemie zmiennego ruchu ładunku (rys. 23). Dodatkowe zmniejszenie zużycia paliwa rzędu 1–2% osiągnąć można stosując przestawiacz krzywki rozrządu (odwrotny cykl Millera).

Kolejnym rozwiązaniem upraszczającym system spalania będzie w przyszłości modulowanie ruchu ładunku za pomocą przepływu spalin (EGR), a nie przez zewnętrzny zawór sterujący – jest to trzecia generacja układu CBR (prawa część rys. 22).

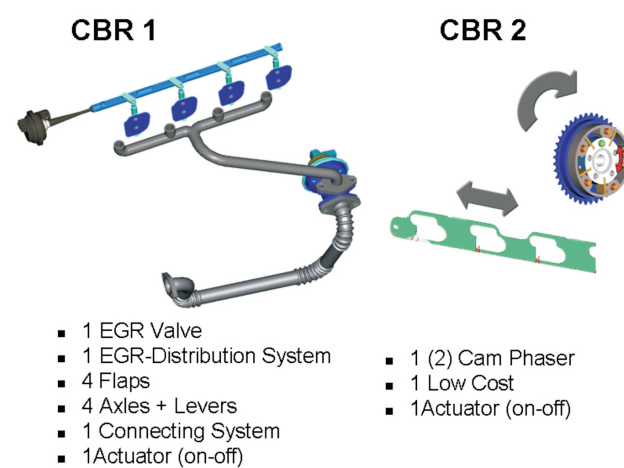
W przypadku sterowania składem ładunku za pomocą zmian ustawienia krzywki i pobierania spalin z układu wylotowego, zawirowanie świeżego ładunku spowodowane kształtem przewodów dolotowych, jest wzmocnione ruchem dopływających spalin. Dodatkowy koszt potrzebny na zrealizowanie zmiennego ruchu ładunku ogranicza się w ten sposób do zastosowania przesłony na zaworze wylotowym (głowica z 2 zaworami na cylinder) lub asymetryczny wznios zaworów wylotowych w przypadku głowicy silnika 4-zaworowego. Jest to uproszczone rozwiązanie, które niewykorzystuje w pełni zmniejszenia zużycia paliwa, jakie można osiągnąć przez konwencjonalne wyłączenie cylindra, to jednak dodatkowy koszt jego wprowadzenia uległ zasadniczemu zmniejszeniu.

Homogeniczny wtrysk bezpośredni

Zasadniczym powodem stosowania homogenicznego wtrysku bezpośredniego była początkowo mniejsza skłonność do spalania stukowego i większa sprawność w porównaniu z wtryskiem do kanału dolotowego. Dzięki temu możliwe było jednoczesne zwiększenie stopnia sprężania i osiągnięcie większego ciśnienia efektywnego na pełnym obciążeniu. Podobnie jak w przypadku zmiennego ruchu ładunku, także uzyskano korzyść w postaci zmniejszenia emisji związków toksycznych. Emisja węglowodorów może być znacznie zmniejszona za pomocą dwuetapowego wtrysku paliwa w połączeniu z odpowiednim kształtem denka tłoka, sterowaniem zaworami oraz zastosowaniem ulepszanego rozgrzewania reaktora katalitycznego. Możliwe jest pominięcie wtrysku powietrza dodatkowego do kanału wylotowego, a jednocześnie zmniejszenie ilości katalizatora – sub-

the simultaneously improved ignition retard tolerance, and therefore better catalyst heating strategies, plus reduced engine out emissions. Thus no secondary air system is necessary and/or the precious metal coating of the catalyst can be reduced, which results in a highly attractive cost balance sheet.

The external exhaust recirculation into the manifold requires appropriate piping and, for good dynamic behaviour, a cylinder-individual distribution system. Furthermore, attention also has to be paid in particular to good resistance to soiling. The change to an internal exhaust recirculation system controlled by camshaft phasing – CBR generation 2, Fig. 22 middle – with the appropriate operating strategy, re-



Rys. 23. Uproszczenie systemu – wyłączanie cylindrów

Fig. 23. System simplification – port deactivation

duces the risk of soiling in the manifold to the extent that instead of the costly single valves with the respective coupling mechanisms, a much more robust and less expensive plastic slider can be used for variable charge motion, Fig. 23. The control strategies that are possible with the cam phaser (Reverse Miller Cycle) offer an additional improvement in fuel consumption of 1–2%.

The next step in simplifying the system in future will be to modulate the charge motion by the EGR mass flow itself and not by an externally controlled port deactivation device, CBR Generation 3, Fig. 22 right. With the residual gas control by camshaft phasers and re-breathing exhaust gas from the exhaust port, the intake-generated basic charge motion is reinforced by an additional charge motion initiated by the re-induced exhaust gas. The extra cost required for the variable charge motion is therefore reduced to a special outlet valve masking (2-valve engine) and also asymmetric lift profiles of the exhaust cam in a 4-valve engine. Although this significantly simplified system does not quite achieve the fuel consumption potential of conventional port deactivation, the additional costs and system complexity are drastically reduced.

Homogeneous direct injection

The main reason for using homogeneous direct injection was originally the more favourable knock behaviour and

stancji czynnych w reaktorze katalitycznym, co stanowi zmniejszenie dodatkowego kosztu zastosowania bezpośredniego wtrysku paliwa. Połączenie układu przedstawiania faz rozrządu i turbodoładowania z systemem wtrysku bezpośredniego, stwarza dodatkowe korzyści: zmniejsza się wrażliwość na spalanie stukowe pod znacznie większym obciążeniem, szczególnie na niskich prędkościach obrotowych w znacznie większym zakresie niż w silnikach z wtryskiem konwencjonalnym (por. rys. 24).

Ponadto może być wykorzystany efekt przepłukania do zwiększenia wartości momentu obrotowego na małych prędkościach w znacznie większym zakresie w przypadku silników doładowanych niż wolnossących. Zastosowanie większego stopnia sprężania pozwala na istotne obniżenie zużycia paliwa na obciążeniach częściowych. Większa odporność na spalanie stukowe zmniejsza zapotrzebowanie na wzbogacenie mieszanki, co również wpływa na mniejsze zużycie paliwa w warunkach pełnego obciążenia. Możliwe do za-

volumetric efficiency at full load compared to manifold injection. With it, it was possible to increase both the compression ratio and full load BMEP. As with the variable charge motion, here too there is a multiple benefit effect in terms of reduced emissions. The HC engine out emission can be drastically reduced by means of double injection in conjunction with appropriate piston geometries and valve timing, and improved catalyst heating strategies can be applied. Omission of the secondary air or the variable charge motion which is then possible, and a reduced catalyst precious metal coating reduce the extra costs of direct injection.

Especially in conjunction with camshaft phasers and turbocharging, direct injection offers additional added value effects. Advantage of its improved knock behaviour can be taken to a much greater extent than with naturally aspirated engines, at significantly higher full-load BMEP, in particular at low engine speeds, Fig. 24. Moreover the scavenging

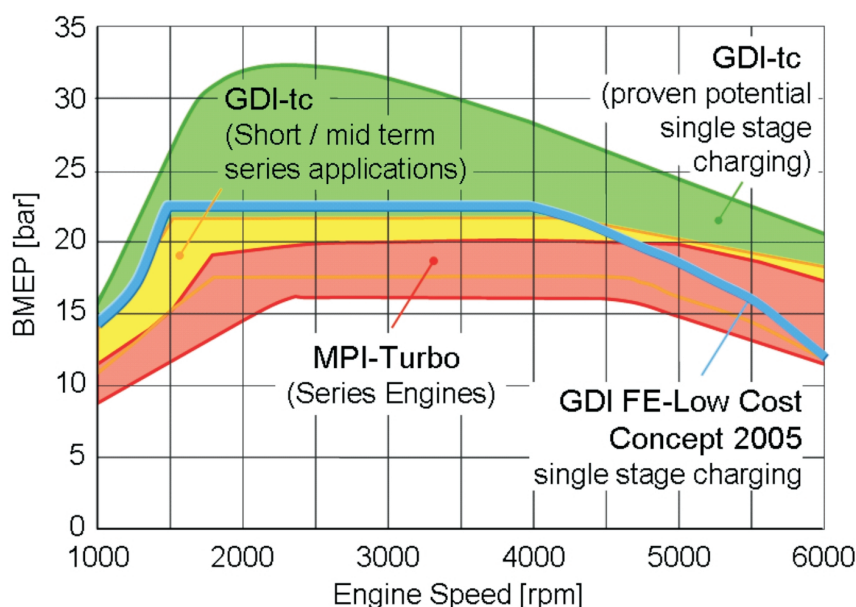
effect can be used to raise the torque at low speed to a greater extent in turbocharged engines than in naturally aspirated engines when the purging of fuel is reduced with the help of the direct injection. The higher compression ratio that is possible provides a significant improvement in part load fuel consumption. The better knock behaviour reduces the enrichment requirement and therefore the fuel consumption at full load. The injection strategies that can be implemented with direct injection not only improve the torque at low speeds but also the dynamic response and, above all, the HC engine out emissions and catalyst heating strategies. That way, in conjunction with turbocharging, tough emission limits can also be achieved at acceptable system costs.

Making specific use of these multiple-benefit effects, this kind of technology

combination represents the perfect basis for downsizing/downrating concepts which, in addition to a double-figure reduction in fuel consumption, also offer significantly increased torque, especially at low speeds, and are therefore more fun to drive.

3. Summary

The market today for passenger cars demands clearly defined, multiple-benefit oriented technology development. Early cost and added value analysis is already a widely used standard. It should not be restricted to the engine alone, however, and must take into account the entire system consisting of engine, transmission and vehicle. Attention must thereby be paid to the different development focuses of the combustion engines – lower emissions for diesel engines – lower fuel consumption and improved fun to drive for gaso-



Rys. 24. Charakterystyka pełnej mocy turbodoładowanego silnika benzynowego

Fig. 24. Full load characteristics of turbocharged gasoline engines

stosowania strategię wtrysku bezpośredniego polepszają przebieg momentu obrotowego na niskich prędkościach obrotowych i właściwości dynamiczne silnika, a przede wszystkim obniżają emisję węglowodorów i czas rozgrzewania reaktora katalitycznego.

Wykorzystując przedstawione możliwości, połączenie tych technologii stanowi podstawę do obniżenia wymiarów i zwiększenia osiągnięć silników (downsizingu/downratingu), które oprócz redukcji zużycia paliwa pozwala na zauważalny wzrost wartości momentu obrotowego, szczególnie przy małej prędkości jazdy.

3. Podsumowanie

Dzisiejszy rynek samochodów osobowych wymaga rozwoju zdefiniowanej, ukierunkowanej na wielostronne korzyści technologii. Analiza kosztu początkowego i kosztów

dodatkowych jest obecnie szeroko stosowanym rozwiązaniem. Jednak nie może ono ograniczać się jedynie do silnika, ale musi uwzględniać cały system, a więc silnik, przekładnię i pojazd. Należy więc skupić uwagę na różnych celach rozwoju silników: na zmniejszeniu emisji spalin silników ZS i obniżeniu zużycia paliwa oraz polepszeniu właściwości jezdnych silników ZI. Wynikający stąd kierunek osiągnięcia korzyści wymaga rozwoju technologii, która zapewni możliwie najlepszą równowagę między dodatkowymi kosztami i zmniejszonym zużyciem paliwa i/lub emisji.

Zastosowanie optymalnych przełożeń dla każdego przypadku umożliwi poprawę właściwości jezdnych, komfortu a także – w niektórych przypadkach – zużycia paliwa i emisji, lecz samo w sobie nie spełni wymagań odnośnie zużycia paliwa i emisji. Tak więc rozwój technologii obniżania zużycia paliwa musi skupić się na silniku.

Hybrydyzacja stanowi efektywny sposób na równoczesne obniżenie emisji i zużycia paliwa a także poprawę właściwości jezdnych. Uzyskana oszczędność – szczególnie zmniejszenie zużycia paliwa – mimo wszystko w znacznym stopniu zależy od stylu jazdy kierowcy i profilu drogi.

Emisja spalin silników ZS może być wyraźnie zmniejszona, a obecne osiągnięcia w tej dziedzinie umożliwiają nie tylko jej utrzymanie, ale również znaczne zmniejszenie. Dobrym przykładem jest zastosowanie turbodoładowania i sterowanie procesem spalania. Turbodoładowanie dwustopniowe o ciągłej regulacji zapewnia nie tylko dużą sprawność na obciążeniach znamionowych, ale również stanowi kompromis pomiędzy emisją tlenków azotu i cząstek stałych. Równocześnie możliwa jest poprawa właściwości jezdnych i zmniejszenia zużycia paliwa – zależnie od zastosowanego rodzaju doładowania. Z kolei sterowanie procesem spalania na podstawie pomiaru ciśnienia w cylindrze stanowi przede wszystkim podstawę realizacji procesu spalania ukierunkowanego na zmniejszenie emisji, ale jednocześnie powoduje zmniejszenie wymagań odnośnie tolerancji związanej z normami zanieczyszczeń i w znacznej mierze pozwala na poprawę sterowania.

Istotne z punktu widzenia klienta, zalety różnych technologii silników ZI nastawione na zmniejszenie zużycia paliwa, zależą w znacznym stopniu od profilu drogi, a więc także od charakterystyki zespołu silnik–przekładnia–pojazd. Wymagania rynku silnie wymuszają rozwój technologii nakierowanej na wielostronne korzyści. Będą one decydowały, która z alternatyw będzie wybrana: utrzymanie takiej samej funkcjonalności przy zmniejszonym wysiłku i czasie, a przez to również koszcie (np. zmienny ruch ładunku), lub wzrost sprawności silnika z zachowaniem wysiłku technicznego (np. homogeniczny wtrysk bezpośredni wraz z turbodoładowaniem).

Rozwiązanie doskonałe, czyli jeden optymalny zespół napędowy do wszystkich zastosowań, obecnie jest rozwiązaniem nie do osiągnięcia. Analizując różne technologie należy mieć na względzie, że nie mogą one skupiać się na pojedynczym celu, lecz powinny możliwie wielostronnie spełniać oczekiwania klienta przez inteligentne połączenie synergii i korzyści.

line engines. Consequent multiple-benefit orientation therefore requires technology developments which not only offer the best possible balance between additional costs and reduced fuel consumption and/or emissions but also additional advantages.

The use of the optimum transmission for each application makes it possible to improve driveability, comfort and also, at specific points, fuel consumption and emissions, but cannot alone enable extreme emission and consumption requirements to be met. Development therefore has to focus on the engine.

Hybridisation offers an effective way of improving emissions and fuel consumption at the same time as driving pleasure. The added value to the customer - in particular with regard to fuel consumption - nevertheless depends to a large extent on the driving profile.

The emissions of the diesel engine can be improved significantly, whereby its current advantages cannot only be retained, but further improved. Turbocharging and combustion control are good examples. Two-stage, continuously controlled turbocharging offers not only the highest full-load potential but also improves the NO_x /soot trade-off. At the same time driving pleasure is increased and reduced fuel consumption is possible – depending on the turbocharging strategy used. Cylinder pressure-based combustion control on the other hand is primarily the basis for emission-oriented alternative combustion processes, and at the same time eases the demanding tolerance problems associated with low emission limits and also makes it possible to improve the control functions significantly.

The customer-relevant fuel consumption advantages of various gasoline engine technologies depend heavily on the load profile and therefore the engine/transmission/vehicle combination. This partly explains the wide diversification in technologies used. This will remain the case in the future, even if not so extreme. Market demands will strongly influence multiple-benefit oriented technology development. They will, in fact, determine which of the alternative, namely achieving the same functionality with reduced time and effort, and thus costs (e.g. variable charge motion) or by increasing engine efficiency with the same technical effort (e.g. homogeneous direct injection in particular in combination with turbocharging) will be chosen.

The perfect solution – one single optimal powertrain for all applications – is not yet in sight. When developing different technologies, however, one maxim applies - they must not be focused on single goals, but aimed at holistically maximising customer benefits through the intelligent exploitation of synergy and multiple benefit effects.

Artykuł recenzowany

Skróty i oznaczenia / Abbreviations and Nomenclature

BMEP	średnie ciśnienie efektywne/ <i>break mean effective pressure</i>	IMEP	średnie ciśnienie użyteczne/ <i>indicated mean effective pressure</i>
BSFC	jednostkowe zużycie paliwa/ <i>break specific fuel consumption</i>	MPI	wielopunktowy wtrysk paliwa/ <i>multi-point injection</i>
CA	kąt obrotu wału korbowego/ <i>crank angle</i>	MT	skrzynia biegów sterowana ręcznie/ <i>manual transmission</i>
CAN	magistrala danych/ <i>control area network</i>	NA	silnik wolnossący/ <i>natural aspired</i>
CBR	system o sterowanej prędkości spalania firmy AVL/ <i>controlled burn rate</i>	NEDC	europejski test jezdny/ <i>new european driving cycle</i>
DeNOx	reduktor katalityczny tlenków azotu	NO _x	tlenki azotu
Downsizing	zmniejszenie głównych wymiarów przy zachowaniu mocy użytecznej	NTE	test nieprzekraczania wartości emisji/ <i>not to exceed</i>
Downrating	zmniejszenie prędkości obrotowej przy zachowaniu mocy użytecznej	OBD	system diagnostyki pokładowej/ <i>on-board diagnostic</i>
DPF	filtr cząstek stałych/ <i>diesel particle filter</i>	OEM	organizacja sprzedająca produkty wytworzone przez inne firmy/ <i>original equipment manufacturer</i>
EGR	recyrkulacja spalin/ <i>exhaust gas recirculation</i>	SCR	selektywna redukcja katalityczna/ <i>selective catalytic reduction</i>
EMS	jednostka sterująca silnika/ <i>electronic management system</i>	SOE	początek wydzielania się (dostarczania) energii/ <i>start of energising</i>
FC	zużycie paliwa/ <i>fuel consumption</i>	TC	turbodoładowanie/ <i>turbocharging</i>
GDI	bezpośredni wtrysk paliwa do silników ZI/ <i>gasoline direct injection</i> (Mitsubishi)	TCI	turbodoładowanie z chłodzeniem powietrza doładowanego/ <i>turbocharging and intercooling</i>
HC	węglowodory/ <i>hydrocarbons</i>	VTG	turbina o zmiennej geometrii/ <i>variable turbine geometry</i>
HSDI	szybkoobrotowy silnik o wtrysku bezpośrednim/ <i>high speed direct injection</i>	VNT	turbina o zmiennej geometrii łopatek kierownicy/ <i>variable nozzle turbine</i>

Literatura/Bibliography

- [1] Weißbäck M., Csato J., Glensvig M., Sams T., Herzog P.: Alternative Brennverfahren – Ein Ansatz für den zukünftigen PKW Dieselmotor (Alternative Combustion Processes – An Approach for Future Passenger Car Diesel Engines), MTZ 9/2003.
- [2] Bürgler L., Cartus T., Herzog P., Neunteufl K., Weißbäck M.: Brennverfahren, Abgasnachbehandlung, Regelung – Kernelemente der motorischen HSDI Diesel Emissionsentwicklung (Combustion Processes, Exhaust Gas Aftertreatment, Control – Core Elements of HSDI Diesel Emission Development). Aachener Colloquium, October 2004.
- [3] Neunteufl K., Unger E. M., Bürgler L., Herzog P. L.: Closed Loop Combustion Control – a Prerequisite for Alternative Diesel Combustion? Le Diesel: Aujourd'hui et Demain, SIA, Lyon, 2004.
- [4] Hülser H., Neunteufl K., Unger E.M., Breitegger B.: Eine zylinderdruckbasierte Motorregelung für niedrigste Emissionen beim Dieselmotor (Cylinder Pressure-based Engine Control for Extremely Low Emissions in Diesel Engines), IAV GmbH – 5th Symposium Powertrain Control Systems for Motor Vehicles, Berlin.
- [5] Klell M., Jauk T., Schutting E., Wimmer A., Eichseder H., Schneider R.: Sensorik für die verbrennungsgeführte Motorregelung bei alternativen Dieselmotoren (Sensors for Combustion-guided Engine Control with Alternative Diesel Combustion Processes), VDI/VDE Congress Vehicle and Engine Control Systems – AUTOREG, Wiesloch, 2004.
- [6] Enderle C., Nolte A., Paule M., Duvinage F.: Der PKW-Dieselmotor im Spannungsfeld der Emissionsgesetzgebung (Passenger Car Diesel Engines Confronted with the Emissions Legislation), 2nd Emission Control, Dresden, 2004.
- [7] Kapus P., Denger D., Holland T.: Intelligent Simplification – Ways Towards Improved Fuel Economy, SAE 2002-01-0236.
- [8] Denger, D., Mischker, K.: The Electro-Hydraulic Valvetrain System EHVS – System and Potential, SAE 2005-01-0774.
- [9] Piock G., Fraidl W.: Ottodirekteinspritzung ohne Denox-Kat? 23. Internationales Wiener Motorensymposium, April 2002.
- [10] Piock W., Fraidl K.G.: Gasoline Direct Injection – Quo Vadis? FISITA 2002, F02V096.
- [11] Fiorenza R., Pirelli M., Torella E., Kapus P., Kokalj G., Leibenbauer M.: VVT+Port Deactivation Application on a Small Displacement SI 4 Cylinder 16V Engine: An Effective Way to Reduce Vehicle Fuel Consumption; SAE 2003-01-0020.
- [12] Fraidl G., Kapus P., Piock W.: Otto-Direkt-einspritzung mit Aufladung – Die Konkurrenz zu dieselmotorischen Antrieben? 26. Internationales Wiener Motorensymposium, April 2005.

Dr Günter K. Fraidl – wicedyrektor Działu Silników Benzynowych, Zespoły napędowe samochodów osobowych, AVL Graz, Austria.

Mr Günter K. Fraidl, Dr. – Deputy Vice President, Gasoline Engines, Powertrain Systems Passenger Cars, AVL, Graz, Austria.



Dr Peter L. Herzog – wicedyrektor Działu Silników ZS, Zespoły napędowe samochodów osobowych, AVL Graz, Austria.

Mr Peter L. Herzog, Dr. – Deputy Vice President, Product Line Diesel Engines, Powertrain Systems Passenger Cars, AVL Graz, Austria.

