

Stefan PISCHINGER*
Hermann Josef ECKER

Forschungsgesellschaft für Energietechnik und Verbrennungsmotoren (FEV) w Aachen – Światowy instytut badawczy silników i pojazdów¹

Forschungsgesellschaft für Energietechnik und Verbrennungsmotoren (FEV) in Aachen – Research Center for Vehicles and Engines worldwide

1. Grupa FEV: w oparciu o współczesność, rozwój na przyszłość

Firma FEV Motorentechnik GmbH powstała w Aachen blisko 30 lat temu, w roku 1978. Początkowo składała się z garstki pracowników zajmujących się projektowaniem i prowadzeniem małego biura. Kierownictwo stanowili – prof. dr Franz Pischinger i dr Manfred Schaffrath. Dzięki ich zdolnościom, bliskim związkom z przemysłem i dbałością o wysoką jakość finalnych wyrobów, rozpoczął się szybki rozwój firmy. Obecnie grupa FEV prowadzi ośrodki badawczo-rozwojowe na trzech kontynentach. Dodatkowo biura techniczne i przedstawicielstwa firmy są zlokalizowane w wielu krajach na całym świecie (rys. 1). Działalność w Polsce rozpoczęto w 2003 roku przez założenie FEV Polska Sp. z o.o. w Krakowie.

Head Quarter Germany

Vehicle Test Center Germany



North American Tech. Center China Tech. Center

Rys. 1. Grupa FEV – główne lokalizacje

Fig. 1. FEV-Group – main locations

Dzisiaj FEV z ponad 1300 doświadczonymi pracownikami i nowoczesnym wyposażeniem dostarcza częściowe i kompletne rozwiązania w dziedzinie konstrukcji i aplikacji silników spalinowych – od małych jednostek poprzez samochody osobowe i ciężarowe do lokomotyw, statków i elek-

1. FEV Group: Supporting the Present, Developing the Future

Almost 30 years ago, in 1978, FEV Motorentechnik GmbH was founded in Aachen. In the early days of the company, there were only a handful of staff planning, designing and running a small office. The managing directors were Prof. Dr. Franz Pischinger and Dr. Manfred Schaffrath. Due to innovation and their closeness to mass production, together with a high commitment to the quality of the finished products, FEV were on their way to global growth.

Significant achievements have been made since the days of company foundation, the FEV group runs now technical development centers on three different continents. In addition, technical offices and representatives are located in numerous countries all over the world (Fig. 1). Local business activities in Poland were started in 2003 by establishing FEV Polska Sp.z o.o. in Krakow.

Today, FEV with its over 1,300 experienced employees and state-of-the-art facilities, produces partial and complete developments of combustion engines as well as their applications – from small units, passenger cars and commercial vehicles to locomotives, ships and power stations. Modern electronics offer opportunities of which the founders of FEV could only have dreamt – but they also pose challenges.

Another area of FEV's business is the development and manufacturing of test technology: FEV plans, produces and distributes complete test bench facilities and their associated parts worldwide.

We will continuously offer our clients new solutions for technical problems. Therefore, FEV will continue to invest in pre-development projects from our own resources. Some of the technologies developed by us have demonstrated their performance and abilities during their operation in vehicles and will be briefly introduced in the following. The question whether a new concept is ready for mass use or not, can best be assessed when it is tested in the vehicle itself.

¹ Tytuł pochodzi od redakcji

trowni. Nowoczesne systemy elektroniczne dają możliwości, o których założyciele FEV mogli tylko marzyć – stwarzają jednak również nowe wyzwania dla konstruktorów.

Innym obszarem działalności FEV jest rozwój i budowa silnikowej aparatury badawczo-kontrolnej. Firma opracowuje, wykonuje i dostarcza kompletne stanowiska hamowniane wraz z całą aparaturą pomiarową.

FEV pragnie stale oferować swoim klientom nowe rozwiązania problemów technicznych, dlatego przeznacza duże środki na własne prace rozwojowe. Niektóre z nowych opracowanych przez FEV konstrukcji są sprawdzane w pojazdach testowych i będą wkrótce wprowadzone do produkcji, a badania trakcyjne są najlepszą drogą do uzyskania odpowiedzi na pytanie, czy nowa koncepcja jest już gotowa do masowego zastosowania.

2. Oczyszczanie gazów wylotowych silników o zapłonie samoczynnym

Nowoczesne samochodowe silniki o zapłonie samoczynnym osiągnęły poziom możliwości, który był prawie niewyobrażalny 10 lat temu. Moc jednostkowa i charakterystyka momentu obrotowego zbliżone do silników z zapłonem iskrowym powodują tak nadzwyczajne własności trakcyjne, że w ostatnich latach na rynku europejskim nastąpiło istotne zwiększenie udziału pojazdów napędzanych silnikami ZS. Swój sukces komercyjny silnik ZS zawdzięcza również mniejszemu zużyciu paliwa i obniżeniu hałasu, co powoduje uzyskanie komfortu jazdy samochodem do poziomu samochodu napędzanego silnikiem ZI. Silnik z zapłonem samoczynnym przyczynia się również do zmniejszenia w ruchu drogowym emisji dwutlenku węgla. Możliwe stało się również znaczne zmniejszenie udziału związków toksycznych w spalinach.

Moc jednostkowa i własności trakcyjne są stale poprawiane przez korekty współczynnika nadmiaru powietrza oraz doskonalenie procesu wtrysku i procesu spalania paliwa. Nowe techniki doładowania, wspomagane częściowo przez osprzęt elektryczny zapewniły poprawę zdolności rozruchowych silnika. Jednakże prawdziwym wyzwaniem jest osiągnięcie ekstremalnie niskich wartości emisji tlenków azotu i cząstek stałych w celu spełnienia wymagań przyszłych regulacji prawnych, bez pogorszenia sprawności silnika ZS. W tym celu należy zwrócić szczególną uwagę na proces tworzenia mieszanek i proces spalania. Postęp w tym obszarze może być dokonany między innymi dzięki zwiększeniu ciśnienia wtrysku paliwa a także większej dokładności sterowania dawką wtryskiwanego paliwa, np. za pomocą wtryskiwaczy piezoelektrycznych. Zmniejszenie zawartości tlenków azotu w surowych spalinach wychodzących z silnika będzie wymagało również zastosowania precyzyjnego algorytmu regulacji ilości i temperatury spalin podlegających recyrkulacji.

Limity emisji Euro 4, które zależą od masy pojazdu, wciąż umożliwiają pewne działania związane z wyborem wygodnych dla producenta sposobów pomiaru emisji spalin. Tym niemniej wytyczne na przyszłość, takie jak propozycje UBA (Niemieckiej Agencji Ochrony Środowiska), któ-

2. Exhaust gas aftertreatment for diesel engines

Modern car Diesel engines have reached levels of capabilities that would have been nearly impossible to imagine 10 years ago. Diesel engines have achieved the specific output of Otto engines and their full-bodied torque characteristics have led to such extraordinary driving qualities that the market share of diesel vehicles in Europe has substantially increased. This success of the diesel engine is also due to its lower fuel consumption and the acoustical driving comfort that comes quite close to that of Otto engine vehicles. The diesel engine makes an important contribution to the necessary reduction of CO₂ emissions in road traffic. It was also possible to reduce the pollutant rates in exhaust gases to a fraction of their original values.

The specific output and the driving behaviour are being continually improved due to air management manipulations and alterations to the injection and combustion technologies. New boosting techniques, partly supported by electrical processes, will steadily improve the starting behaviour. However, the real challenge lies in reaching the extremely low NO_x and particle emission values of the future exhaust gas legislation without compromising the advantages of the diesel engine and its operational efficiency. In order to achieve these goals, further progress with regard to mixture build-up and combustion is necessary. This progress can be made, amongst other things, due to increased injection pressure levels as well as a more precise and more flexible injection technology, for example with piezoelectrically controlled valves. In order to reduce the raw emissions we will also need to use the characteristic diagram for controlling the dosing and cooling of the redirected exhaust gases.

The Euro 4 limiting values, which depend on the vehicle weight, still allow some play with regard to the selection of suitable measures for the exhaust gas aftertreatment. However, the emission guidelines that are planned for the future, like the UBA proposal (German Federal Environmental Agency), which is being discussed at the moment, will clearly limit the possibilities for engine designers. On the basis of a state-of-the-art, swirl-supported, direct injection procedure, it becomes obvious that all vehicle weight classes will need to be fitted with technologies that reduce nitrogen oxide as well as other particles. These technologies may be new solutions for exhaust gas aftertreatment as well as, for the more distant future, new combustion procedures with a more homogenised mixture or combinations of procedures and exhaust gas aftertreatment.

With its ability to reduce particle emission, including the very small particles which are regarded as crucial, by more than 90%, the particle filter is a technology that can significantly contribute to the increasing acceptance of the diesel engine – in Germany and worldwide. Therefore, today's developments focus in particular on the question of how to solve the problem of filter regeneration as easily and as cost-effectively as possible.

The issue of how to tackle the reduction of NO_x emissions is much less straightforward. Figure 2 shows the necessary efficiency of a nitrogen oxide-reducing technology

re są w tej chwili opracowywane, wyraźnie ograniczą możliwości konstruktorów silników. Na podstawie aktualnego stanu wiedzy staje się jasne, że wszystkie pojazdy, niezależnie od ich masy, będą musiały być wyposażone w techniczne rozwiązania obniżające emisję tlenków azotu i cząstek stałych. Rozwiązania te mogą polegać na nowych sposobach obróbki gazów wylotowych, a także, w dalszej przyszłości, na nowych systemach spalania bardziej homogenicznej mieszanki lub połączeniu systemu spalania i oczyszczania spalin.

Metoda ograniczenia emisji cząstek stałych w spaliniach za pomocą filtra o sprawności przekraczającej obecnie 90%, może znacząco przyczynić się do wzrastającego uznania silnika ZS w Niemczech i na całym świecie. Dlatego uwaga współczesnych konstruktorów jest skupiona na problemie możliwie łatwej i taniej regeneracji wspomnianych filtrów.

Zmniejszenie emisji tlenków azotu jest znacznie trudniejsze. Na rysunku 2 przedstawiono wymaganą sprawność redukcji tlenków azotu w zależności od osiągniętej emisji w surowych spalinach mierzoną w teście NEDC. Limity emisji tlenków azotu według normy Euro 4 i proponowanych przez UBA wytycznych do normy Euro 5 są przedstawione w postaci słupków.

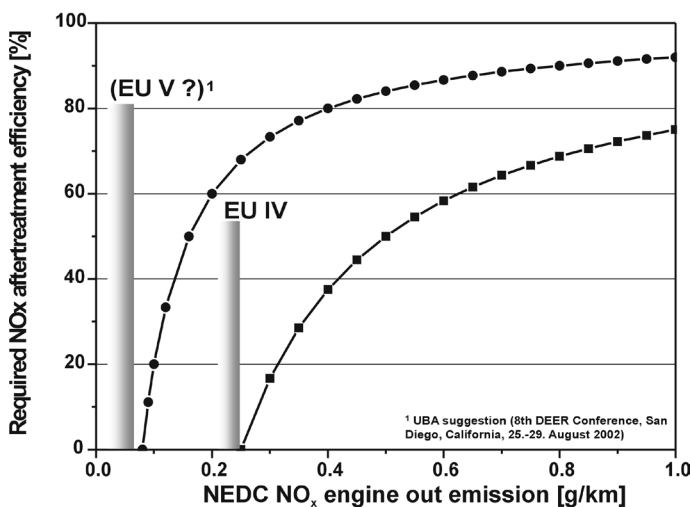
Przykładowo, aby spełnić wymagania normy Euro IV w pojeździe należy zmniejszyć emisję tlenków azotu o 0,17g/km, co odpowiada rzeczywistej sprawności ich redukcji o 68%. Biorąc pod uwagę obecne możliwości techniczne, tak wysoka sprawność redukcji tlenków azotu może być osiągnięta za pomocą dwóch znanych metod – jedna to zastosowanie reaktora magazynującego tlenki azotu, a druga jest znana pod nazwą SCR (selektywna redukcja katalityczna). Największymi problemami związanymi z reaktorem magazynującym tlenki azotu są – jego trwałość, stabilna regulacja układu przy zasilaniu bogatą mieszanką oraz ograniczenie efektu starzenia, szczególnie na skutek wpływu siarki.

Kompaktowy układ SCR (rys. 3) zamontowany w pojeździe zapewnia wymagany zapas amoniaku na wystarczająco długi odcinek jazdy, np. w okresach między kolejnymi serwisami.

System ten przewidziany dla samochodów osobowych i lekkich ciężarowych jest obecnie intensywnie testowany w laboratoriach i podczas badań drogowych. Jako stałego czynnika redukującego użyto karbaminianu amonu. Jest to związek charakteryzujący się wysokim stopniem sublimacji już w niskiej temperaturze 60°C. Co więcej, proces parowania jest odwracalny, tzn. kiedy substancja w stanie gazowym jest ochładzana w układzie zamkniętym, wraca ponownie do stanu wyjściowego. Te cechy zapewniają, że po pewnym czasie w pojeździe jest magazynowana tylko nieznaczna ilość gazowego amoniaku.

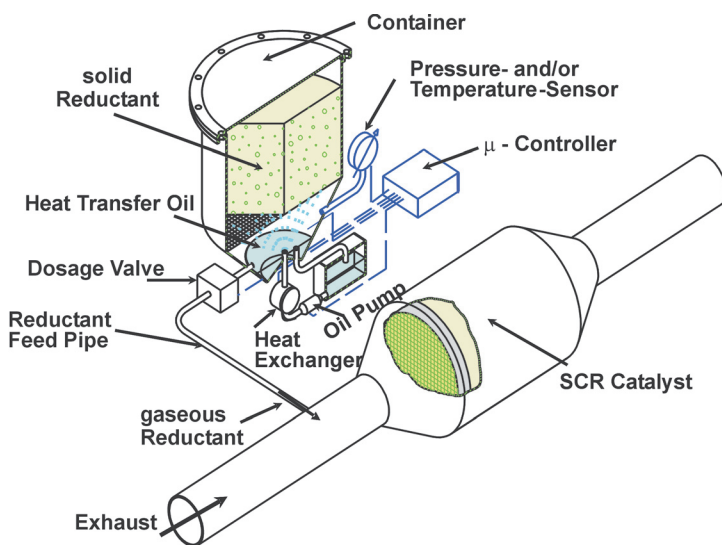
Metoda selektywnej redukcji katalitycznej (SCR) jest wypróbowanym środkiem do radykalnego zmniejszenia emisji tlenków azotu w samochodach osobowych i lekkich samochodach ciężarowych z

for exhaust gas aftertreatment depending on the achievable NO_x raw emissions in the NEDC test. Additionally, the NO_x limits for Euro 4 and the UBA proposal for Euro 5, which is currently discussed, are marked as bars. For example, in or-



Rys. 2. Wymagana sprawność konwersji NO_x w funkcji emisji końcowej
Fig. 2. Required NO_x-aftertreatment efficiency as a function of engine-out emission

der to reduce the NO_x emission by 0.17 g/km for a vehicle with a Euro 4 application level without the use of an exhaust gas aftertreatment that would reduce nitrogen oxide, an active NO_x aftertreatment with an efficiency of 68% is required. Given the present availability of technology, such high NO_x reduction rates can only be achieved with the help of two known means – one being the NO_x storage catalyst and the other being known as SCR (*Selective Catalytic Reduction*). The biggest challenge regarding the NO_x storage catalyst is in the long-term, stable calibration of the rich-mixture operation as well as the improvement of ageing effects, particularly due to the influence of sulphur.



Rys. 3. Schemat działania kompaktowego systemu SCR ze stałym czynnikiem redukującym
Fig. 3 Operating principle of the compact Solid SCR-System (schematic)

silnikiem ZS, przy czym ma tylko nieznaczny wpływ na zwiększenie zużycia paliwa. Układ SCR z reduktorem w fazie stałej, ze względu na swoje stosunkowo niewielkie rozmiary, jest bardzo interesującą alternatywą dla rozwiązań z ciekłym mocznikiem przewidzianych do samochodów osobowych. Poza tym kierowca nie ma potrzeby regularnego uzupełniania czynnika redukującego. Eksperymentalny pojazd wyposażony w analogiczny system wykazał praktyczne możliwości skutecznego obniżenia emisji tlenków azotu w spalinach przy wykorzystaniu tej metody. Przyszłe zadania związane z rozwojem konstrukcji będą związane w szczególności z optymalizacją przepływu i wykorzystania ciepła w celu dalszego zmniejszenia zużycia paliwa. Badania prowadzone w FEV pozwalają na wyciągnięcie wniosku, że spełnienie wymagań normy Euro 4 odnośnie emisji tlenków azotu w spalinach spowoduje wzrost zużycia paliwa o ok. 1÷3,5%. Wartość ta mieści się w zakresie typowym dla reaktora magazynującego tlenki azotu i może być traktowana jako bardzo sprawna metoda w porównaniu z działaniami dotyczącymi zmian konstrukcyjnych silnika. W przeciwieństwie do reaktora magazynującego, system SCR opiera się na ciągłym procesie, który nie wymaga obowiązkowej interwencji w proces spalania w cylindrze silnika.

3. Downsizing i zmienny stopień sprężania (VCR)

*Downsizing*² jest metodą wpływającą na zmniejszeniu zużycia paliwa, a w następstwie decyduje o powodzeniu silnika ZS. Praca silnika w zakresie zwiększonego obciążenia, będąca wynikiem zmniejszenia objętości skokowej, prowadzi do zmniejszenia strat tarcia, a w przypadku silnika ZI – dodatkowo do zmniejszenia strat dławienia przepustnicą. Stąd też *downsizing* wyznacza również kierunek rozwoju silników ZI. Pojawia się tu jednak problem polegający na tym, że zwiększone obciążenie powoduje konieczność zmniejszenia stopnia sprężania, co w konsekwencji prowadzi do mniejszej sprawności w zakresie częściowych obciążeń oraz powoduje konieczność wzbogacenia mieszanki paliwowo-powietrznej.

W celu pełnego wykorzystania możliwości tkwiących w zmniejszeniu objętości skokowej silnika, można zastosować układ bezstopniowej regulacji stopnia sprężania (VCR – *Variable Compression Ratio*), odpowiednio dopasowujący się do aktualnego stanu pracy silnika. Rozwiązanie to polega na mimośrodowym podparciu wału korbowego silnika. Umożliwia to pionową zmianę pozycji wału w stosunku do główicy cylindrowej na skutek obrotu mimośrodów. Rezultatem jest zmiana stopnia sprężania w zakresie 8 do 16 realizowana w sposób ciągły (bezstopniowo). Elektryczny silnik krokowy pozwala na szybką reakcję układu: 0,1 s przy zmniejszeniu stopnia sprężania i 0,5 s przy jego zwiększaniu.

Aktualnie eksploatowany samochód badawczy, którego silnik jest wyposażony w układ VCR, dysponuje momentem obrotowym 300 N·m, ciśnieniem użytecznym 21 bar przy 2300 obr/min i mocą użyteczną 160 kW przy 5000 obr/min. Sterownik układu zapewnia spełnienie przez silnik

The compact, solid-matter SCR system (Fig. 3) makes it possible to provide the required ammonia stock for a sufficiently long driving distance, for example between two servicing intervals, inside the vehicle itself. This system, which is suited for diesel cars as well as lightweight commercial vehicles, has already been tested intensively in laboratories and on the road. Ammonium carbanat, a pre-product from the urea production, is used as a solid reducing agent. Ammonium carbanat is characterised by its ability to reach considerable sublimation rates at temperatures as low as 60°C. Furthermore, the evaporation process is reversible, i.e. when the substance is cooled down from the gas phase in a closed system, it reverts back to ammonium carbanat. These characteristics guarantee that over time no significant amount of ammonia is stored in the vehicle.

The SCR technology is a tried and tested means for the drastic reduction of nitrogen oxide emissions from diesel cars and lightweight commercial vehicles with moderate effects on diesel consumption. Because of its significantly reduced volume, the solid-matter SCR system offers an interesting alternative to the liquid urea solution for individual traffic, given that there is no need for regular refills of the reduction agent by the driver. The demonstration vehicle was able to proof the feasibility for, as well as the potential of, an efficient nitrogen oxide reduction. The future challenge regarding the further development of the system lies in particular in optimising the heat management in order to achieve a further reduction of the fuel consumption. Our research has lead to the conclusion that there will be a consumption increase between 1 and 3.5% in relation to a reduction to a third of the Euro 4 nitrogen oxide level. This value is in the range of a NO_x storage catalyst and can be regarded as extremely efficient in comparison to emission-reducing measures inside the engine. In contrast to the NO_x storage catalyst, the SCR system involves a continuous process, which doesn't require any mandatory intervention in the combustion procedure.

3. Downsizing with continuously variable compression (VCR)

Downsizing is a decisive factor for the economical consumption and the subsequent success of the diesel engine. The increased specific utilisation due to downsizing leads to a reduced heat loss and friction loss and, for the Otto engine, additionally to a reduced throttling loss. Therefore, downsizing will also lead the way into the future for the Otto engine. However, the increased load spread for the Otto engine results from the necessary compression reduction and the less efficient part-load consumption as well as an increased need for enrichment.

In order to use the full potential of downsizing, variable compression could be used, which is set depending on the operating point. The new system is based on an eccentric crankshaft bearing. This enables a vertical change of position of the crankshaft in relation to the cylinder head due to the rotation of the eccentric. As a result, the compression can be adjusted continuously. The alteration of the compres-

² zob. także Silniki Spalinowe 2/2004

normy Euro 4. W szerokim zakresie obciążeń częściowych możliwe jest stosowanie dużego stopnia sprężania wynoszącego $\epsilon = 16$. Nawet wtedy, gdy pojazd porusza się ze stałą prędkością 140 km/h stopień sprężania ma nadal wartość $\epsilon = 14$. Pełny zakres regulacji stopnia sprężania wykorzystywany jest tylko w przypadku przyspieszania z pełną mocą i maksymalnym ciśnieniem doładowania. Zastosowanie zmiennego stopnia sprężania umożliwia zmniejszenie zużycia paliwa w teście NEDC o ponad 7%.

4. Wpływ konstrukcji silnika na zużycie paliwa

W nowoczesnych silnikach ZI w trakcie realizacji testu NEDC około 20% zużytego paliwa przypada na pracę tarcia wewnętrznego silnika. Ten stosunek jest nawet większy w przypadku procesów spalania optymalizowanych pod kątem niskiego zużycia paliwa (np. silniki z bezpośrednim wtryskiem benzyny). Badania rozpoznawcze wykazały, że w najbliższym dziesięcioleciu będzie możliwe wykorzystanie części tej rezerwy sprawności silnika i w wyniku zmian konstrukcyjnych osiągnięcie dalszej oszczędności w zużyciu paliwa, nawet o ponad 10%.

Wał korbowy jest jednym z kilku elementów, które mają znaczny udział w oporach tarcia silnika. Na rysunku 4 pokazano zależność momentu tarcia współczesnych łożysk wału korbowego od średnicy łożyskowania. Wyraźnie widać duży rozrzut wartości, który jest głównie wynikiem różnego luzu łożyskowego spowodowanego cechami materiału wału lub konstrukcją łożyska. Wały korbowe pracujące z niskim współczynnikiem tarcia, w silnikach z kadłubem aluminiowym pracują w nominalnej temperaturze pracy z dużym luzem łożyskowym, a w silnikach z kadłubem żeliwnym duży luz występuje na zimno. Jednakże duży luz

ratio from 8 to 16 is achieved with the help of an electric motor with adjustment times of 0.1 sec ($\epsilon \downarrow$) or 0.5 sec ($\epsilon \uparrow$) respectively.

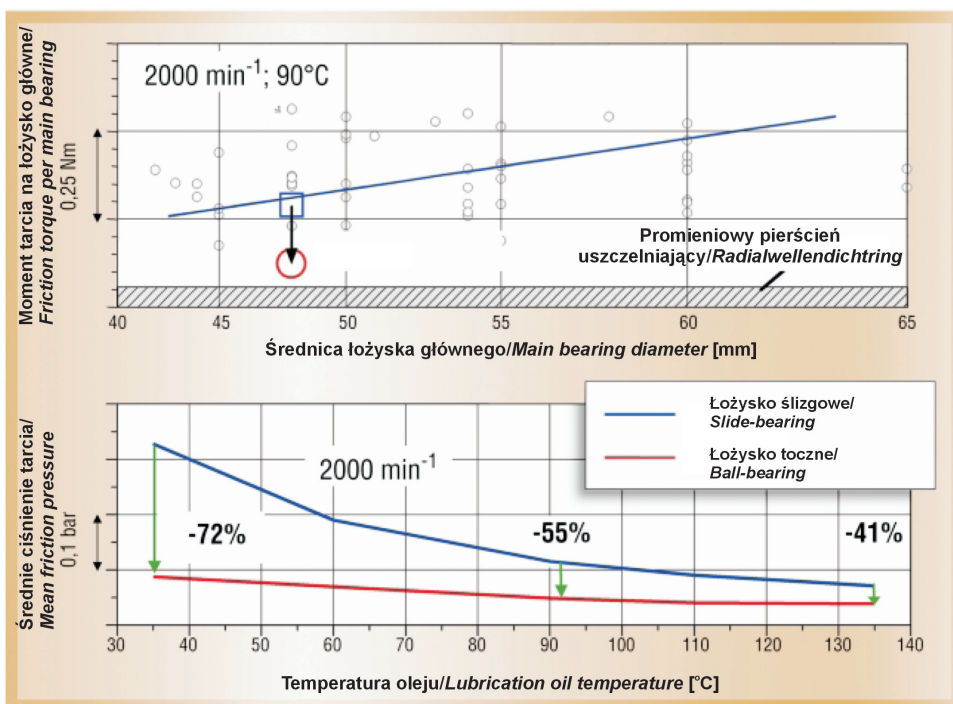
The demonstration vehicle with variable compression in its current application has a torque of 300 N·m or 21 bar medium pressure respectively, which are achieved from 2,300 rpm as well as a power of 160 kW at 5,000 rpm. The calibration fulfils the requirements of the emission level EU IV. For wide areas of the part-load characteristics, the careful adjustment of the combustion procedure makes it possible that the maximum position of the compression ratio is reached at the end position ($\epsilon = 16$). Even when the vehicle drives at a constant speed of 140 km/h, the compression ratio is still at a comparatively high 14. The maximum setting range is only required at full-load acceleration with the maximum boost pressure. It was possible to prove the potential of this development due to the reduction in consumption of more than 7% by variable compression alone, which was determined in the NEDC.

4. Constructive contributions to fuel savings

For modern car Otto engines, the fuel consumption in the NEDC is determined with a proportion of about 20% of the engine friction – this proportion is even higher for consumption-optimised combustion processes (e.g. GDI). Pre-development work has shown that it will be possible to realise a part of this potential over the next ten years and to achieve fuel savings of more than 10% due to constructive measures.

The crankshaft is one of several engine components that contribute significantly to engine friction. Figure 4 shows the friction spread of today's crankshafts depending on the bearing diameter.

At a first glance, the big spreading range becomes obvious, which is mainly a result of the different bearing lash due to the crankcase material or the bearing design. All of the crankshafts that display little friction operate either in aluminium engines with big bearing lash at operating temperature or in cast iron engines, which already have a big bearing lash when they are cold. However, a big bearing lash causes high oil throughput in the bearings, which again has a negative effect on the oil pump capacity and subsequently the friction performance of the oil pump. Furthermore, the diameter of the radial shaft sealing rings as well as their initial tension has an influence



Rys. 4. Możliwości zmniejszenia tarcia wału korbowego
Fig. 4. Friction Reduction Potential for Crankshaft Bearing

łożyskowy powoduje intensywne przecieki oleju, co z kolei wymaga zwiększenia wydajności pompy olejowej i w konsekwencji zwiększenia jej oporów tarcia. Poza tym średnica promieniowych uszczelnień wału i ich napięcie wstępne ma także wpływ na opory tarcia wału. Na dolnej części rysunku 4 pokazano przeciętny moment tarcia w uszczelnieniach promieniowych wału korbowego.

Wyraźne zmniejszenie oporów tarcia wału korbowego można osiągnąć przez zamianę łożysk ślizgowych na łożyska toczne. Pomiary wykazały, że w temperaturze 90°C można osiągnąć zmniejszenie oporów tarcia o około 55%. Poprawa uzyskiwana w wyniku zastosowania łożysk tocznych jest szczególnie widoczna w niskiej temperaturze. Dodatkowo, strumień oleju smarującego łożyska toczne wału korbowego może być zmniejszony o ponad 40%, co również wpływa na zmniejszenie strat mechanicznych. Zastosowanie łożysk tocznych wału korbowego i korbowodów w połączeniu z odpowiednią pompą olejową może w temperaturze 90°C przy prędkości 2000 obr/min prowadzić do zmniejszenia sił tarcia nawet o 24%. Wspomniane rozwiązanie konstrukcyjne przynosi wymierny efekt w postaci zmniejszenia zużycia paliwa w teście NEDC o ponad 5%.

5. Gaz ziemny (CNG Turbo)

Gaz ziemny, jako alternatywne paliwo, nabiera coraz większego znaczenia w przemyśle silnikowym. Obecnie dla użytkowników samochodów głównym powodem zmiany rodzaju paliwa z benzyny lub oleju napędowego na gaz ziemny jest aspekt ekonomiczny. Instalacje zasilania gazem przewidziane do montażu w silnikach starszej generacji, dostępne na rynku w Niemczech, oferują koszty eksploatacji pojazdu w przeliczeniu na kilometr przebiegu na poziomie około 40% kosztów przy zastosowaniu benzyny.

Udokumentowane, bogate zasoby gazu ziemnego skłaniają do coraz większego zainteresowania tym paliwem. Drugim, niemniej ważnym powodem są względy ekologiczne, wynikające z mniejszej emisji związków toksycznych w spalinach silnika zasilanego tym paliwem. Dzięki dużej zawartości metanu w gazie ziemnym, węglowodory emitowane w spalinach składają się w ponad 90% właśnie z metanu, który jest stosunkowo nieszkodliwy dla organizmu człowieka. Inne substancje, jak związki aromatyczne, benzen i aldehydy występują śladowo w spalinach silnika zasilanego gazem ziemnym. Dodatkowo, emisja tlenków azotu i tlenku węgla jest również niższa w porównaniu z silnikami zasilanymi benzyną.

W celu lepszego wykorzystania zalet gazu ziemnego w przyszłych konstrukcjach silników i mając na uwadze spodziewane wymagania odnośnie emisji spalin, dla celów badawczych zastosowano wysoki stopień doładowania, *downsizing* oraz zasilanie przy wartości współczynnika składu mieszanki $\lambda=1$. Pojazd testowy dysponował silnikiem ZI o objętości skokowej 1,8 dm³ przystosowanym do zasilania gazem ziemnym. Podstawowym problemem występującym w silnikach zasilanych gazem ziemnym jest katalityczna obróbka gazów spalinowych. Metan jest stosunkowo trwałą cząsteczką,

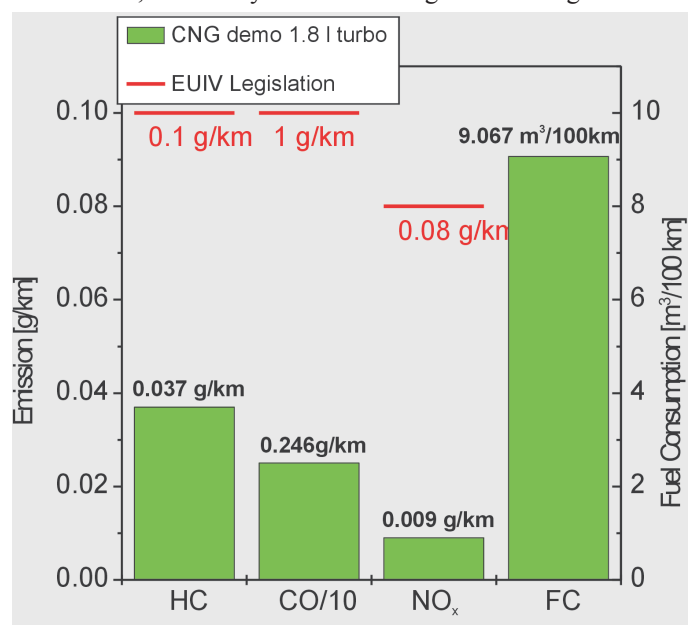
na the friction level of the crankshaft. For this reason, the lower part of Figure 4 shows the usual friction proportion of both radial shaft sealing rings.

A high potential for reduced friction can be realised, if a sliding bearing is substituted by a rolling bearing. The displayed potential of approx. 55% at 90°C has been proved by means of measurement technology. Apart from that, the improvement due to the use of rolling bearings at low temperatures is of importance. Additionally the oil volume flow for a crankshaft on a rolling bearing can be reduced by more than 40%, which also contributes to a decrease in friction. The use of a rolling bearing for crankshaft and connecting rod, together with the adapted oil pump, at a part-load operating point of 2,000 rpm and 90°C, leads to a reduction in engine friction of up to 24%. This results in a reduced consumption by more than 5% in the NEDC. This potential has been proved in a specially adapted vehicle.

5. Natural gas (CNG Turbo)

Natural gas gains increasing importance as an alternative fuel in the automobile industry. Currently, the main motivation for people to switch from petrol or diesel to natural gas as a vehicle fuel is that natural gas is cheaper than petrol or diesel. The initial equipment and retrofit kits for natural gas in Germany that are available on the market today have a fuel price per kilometer that ranges at about 40% of that of petrol engines.

The advantages of natural gas, apart from the overall situation concerning the future availability of resources, which moves more and more towards natural gas, are also that natural gas achieves better emission values. Due to the high methane content of the fuel, the emitted hydrocarbons consist of more than 90% methane, which is relatively harmless to the human body. Other substances like aromatic compounds, benzenes and aldehydes that are harmful to people's health, can hardly be found in engine exhaust gases. Addi-



Rys. 5. Emisja pojazdu badawczego z silnikiem 1,8 dm³ Turbo CNG
Fig. 5. Emissions of the 1.8 l CNG-Turbo Demonstrator Vehicle

co powoduje nie tylko niższy stopień konwersji w reaktorze katalitycznym, ale także wymaga zawężonego przedziału wartości λ i wyższej temperatury aktywacji.

Badany pojazd spełnił z zapasem wymagania normy Euro 4, co przedstawione zostało na rysunku 5. W tym celu, niezależnie od optymalizacji faz rozrządu, zastosowano specjalną procedurę nagrzewania reaktora katalitycznego. Spowodowało to zmniejszenie emisji związków toksycznych w spalinach w okresie nagrzewania reaktora.

Zmniejszenie emisji związków toksycznych wymusza jednak poprawę trwałości reaktora i precyzji systemu sterowania silnika. Ponadto, dzięki zmniejszonej czułości gazu ziemnego na zjawisko spalania stukowego można uzyskać znaczną poprawę parametrów użytecznych.

Na rysunku 6 przedstawiono charakterystykę zewnętrzną silnika zasilanego gazem ziemnym, w porównaniu z turboładowanymi silnikami dostępnymi na rynku. Można osiągnąć średnie ciśnienie użyteczne powyżej 20 bar i moc jednostkową 80 kW/dm³ przy jednoczesnym zmniejszeniu zużycia paliwa. Wartości ciśnienia są ograniczone trwałością silnika, konstrukcją łożysk i wydatkiem wtryskiwaczy paliwa. Ze względu na stechiometryczny skład mieszanki palnej i optymalne warunki spalania nawet przy pełnym obciążeniu, silniki zasilane gazem ziemnym charakteryzują się małym zużyciem paliwa w codziennej eksploatacji, w tym również przy pełnym obciążeniu. Ocenia się, że w tym przypadku *downsizing* powinien zapewnić w warunkach testu i w codziennej eksploatacji zmniejszenie emisji CO₂ o około 50% w porównaniu z benzynowymi silnikami ZI o podobnej mocy.

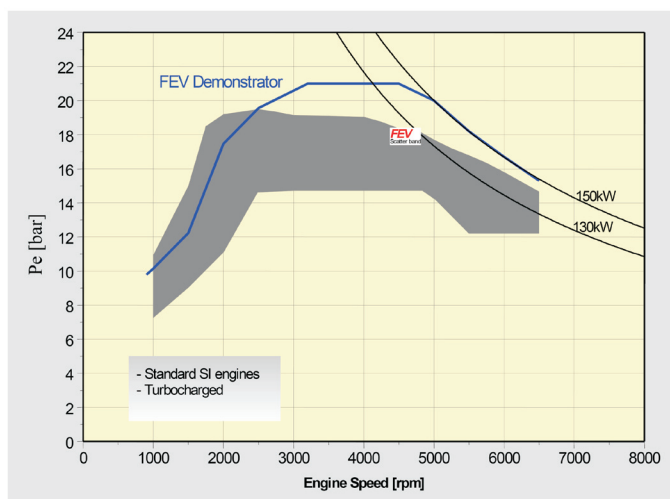
6. Podsumowanie

W ciągu ostatnich 10 lat pod względem mocy jednostkowej, zużycia paliwa i emisji toksycznych substancji w spalinach jednostki napędowe pojazdów samochodowych zostały udoskonalone w znacznie większym stopniu niż na przestrzeni wielu ubiegłych dekad. Obecnie nawet silnik ZS wykazuje doskonałe własności eksploatacyjne i wysoką sprawność dzięki bezpośredniemu wtryskowi paliwa i układom regulacji doładowania. Wynikiem tego stanu rzeczy jest uznanie konsumentów, dzięki któremu w ciągu wspomnianego okresu sprzedaż pojazdów wyposażonych w tego typu silniki uległa blisko podwojeniu. W silnikach stosowana jest szeroka gama nowych rozwiązań i technologii, do których można zaliczyć: regulację faz rozrządu, bezpośredni wtrysk benzyny i *downsizing*, czyli zwiększenie mocy jednostkowej za pomocą ulepszonych systemów doładowania. Wszystkie te technologie służą zarazem obniżeniu zużycia paliwa. W tym samym czasie na rynku oferowane są również silniki zasilane gazem ziemnym i napędy hybrydowe.

Na rysunku 7 przedstawiono prognozę firmy FEV dotyczącą rozwoju jednostek napędowych na następne 10 lat. Na podstawie badań można wnioskować, że w tym okresie odsetek silników ZS w nowych samochodach osobowych wchodzących na rynek zachodnioeuropejski znacznie wzrośnie i przekroczy 40%. Z kolei prawie wszystkie przyszłe

tyonalnie, the exhaust gas of an Otto engine fuelled by natural gas contains a lower rate of nitrogen oxide and carbon monoxide in comparison with petrol engines.

In order to use the advantages of natural gas for future engine concepts more consistently – bearing in mind future emission requirements – high boosting with downsizing and the lambda 1 concept are an interesting development. A demonstrator vehicle with a 1.8 litres turbocharged Otto engine has been modified to run on natural gas. A critical issue with natural gas vehicles is the exhaust gas aftertreatment - methane is a relatively stable molecule, which means that it displays not only lower conversion rates but also a narrowed lambda window and higher light-off temperatures. The vehicle was able to remain significantly below the EU4 exhaust gas limits, as shown in Figure 5. For this purpose, apart from optimising the control phase, a modified catalyst heating strategy was chosen in order to enhance the catalyst heating-up. At the same time, the raw emissions during the phase prior to light-off were minimised. Apart from the development focus on emission reduction that aims at an improved ageing behaviour and the functional improvement of the engine control system, the power potential of the engine due



Rys. 6. Charakterystyka prędkościowa silnika 1,8 dm³ Turbo CNG

Fig. 6. Full Load of the 1.8l CNG-Turbo Demonstrator

to a reduced sensitivity to engine knocking is significantly higher. Figure 6 shows the full-load characteristics that can be realised in comparison with turbocharged engines that are available on the market today. Medium pressures of more than 20 bar and specific performance of 80 kW/dm³ can be achieved with natural gas engines whose consumption values are reduced at the same time. These medium pressures are limited by engine stability, bearing layout and injector flow rates. Due to their stoichiometric operation with an optimised position of the combustion even at full load, natural gas engines are characterised by the lowest consumption values even at full load, in particular in day-to-day operation. The CO₂ advantage due to the possibilities of downsizing should be rated at an astonishing 50% in comparison to equally powerful petrol engines, under test conditions as well as day-to-day driving conditions.

silniki ZI będą zawierać przynajmniej jedno z wymienionych wyżej rozwiązań technicznych. Niezależnie od klasycznych układów, będą się rozwijać tak zwane napędy alternatywne, których udział w rynku samochodowym osiągnie wartość około 5%.

Wszystkie nowe rozwiązania muszą być przygotowane do masowej produkcji zanim zostaną wprowadzone na rynek. W związku z ogromną różnorodnością możliwych technologii zmniejszenia zużycia paliwa i emisji toksycznych związków w spalinach silników ZI i ZS, przy wyborze konkretnych rozwiązań istotną rolę odgrywać będzie czynnik ekonomiczny. Odnosi się to także do działań związanych z pracami badawczo-rozwojowymi, których intensywność

6. Summary

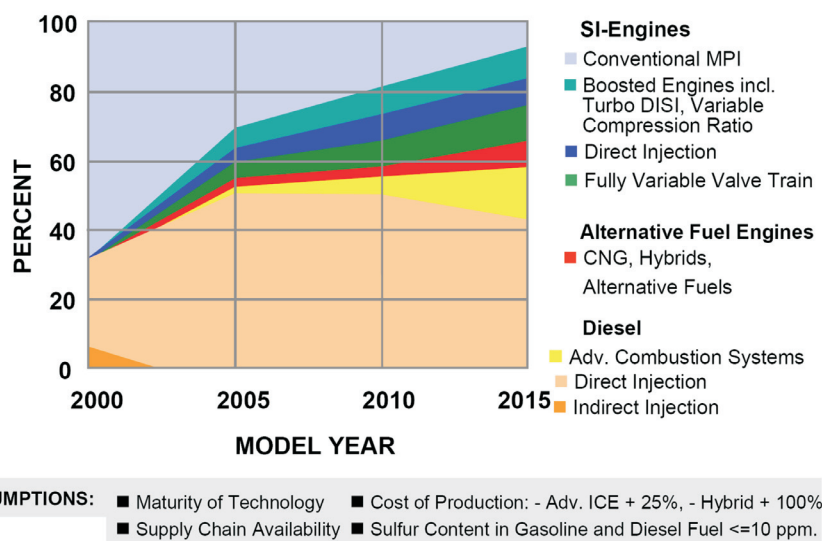
Over the past 10 years, the drive units of motor vehicles have achieved more improvements in terms of power density, fuel consumption and pollutant emissions than in many previous decades. Now, even the diesel engine displays excellent driving characteristics due to direct injection and variable boosting in addition to its consumption advantages. As a result, consumer acceptance has nearly doubled over the respective period. Otto engines can now choose from various new technologies like variable valve control, direct injection and the increase of their specific power with the help of improved boosting systems, all of these technologies being employed to reduce their petrol consumption. At the same

time, natural gas engines and hybrid drive systems are offered on the market.

Figure 7 displays FEV's prognosis for the next 10 years. According to our research, the percentage of diesel engines with regard to all new passenger cars coming on the market in western Europe every year will significantly increase to more than 40%. Nearly all future Otto engines will display one or the other of the new technologies. Apart from these, the so-called alternative drive systems will have a market share of approx. 5%.

All of those new developments will need to be prepared for mass production before they can reach the market. With regard to the huge variety of possible technologies for the reduction of fuel consumption

and pollutant emission for Otto and Diesel engines, the cost factor will play an ever more important role. This applies to the development effort that could increase significantly, in particular due to the increasing number of tuning parameters for direct-injection Otto or Diesel engines with soot filters. In these areas, FEV have developed suitable tools and intelligent management systems, which improve the development results and lead to substantial savings. FEV looks forward to a future full of interesting challenges. To this aim, we will continue to invest in our own pre-development projects, in order to be able to offer our clients new solutions that we will market in close cooperation with them.



Rys. 7. Prognoza rozwoju rodzajów silników w Europie

Fig. 7. Future View of the Market Share of Engine Technologies in Europe

może znacznie się zwiększyć, w szczególności z powodu wzrastającej liczby parametrów sterujących dla silnika ZI z bezpośrednim wtryskiem paliwa lub silnika ZS z filtrem sadzy.

Z myślą o potrzebach placówek badawczych firma FEV opracowała odpowiednie narzędzia oraz inteligentne systemy sterujące i zarządzające procesem badań. Zastosowanie tych urządzeń pozwala na usprawnienie prac badawczych i osiągnięcie konkretnych oszczędności finansowych.

FEV przewidując zainteresowanie przyszłymi wyzwaniami badawczymi nie przestaje inwestować we własne prace o charakterze prototypowym. Uzyskuje w ten sposób możliwość zaoferowania klientom nowych rozwiązań, które będą wprowadzone na rynek w ścisłej kooperacji z nimi.

Artykuł recenzowany

Prof. dr inż. Franz Pischinger – dyrektor Instytutu Silników Spalinowych VKA na Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule w Aachen, prezes FEV, Aachen.

Prof. Franz Pischinger, DSc. MEng. – Head of Institute of Verbrennungskraftmaschinen Aachen, at Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, President of FEV in Aachen.



Dipl.-Ing. Herman Josef Ecker – dyrektor firmy FEV Polska, Kraków, członek zarządu FEV Aachen.

Mr. Herman Josef Ecker, BEng. – Director of FEV Polska Company, Kraków, Member of the Board of FEV Aachen.

