

Marek BRZEŹAŃSKI*
Krzysztof ŚLIWIŃSKI**

Downsizing – nowy kierunek rozwoju silników samochodowych

Producenci samochodów w Europie będą zobowiązani do spełnienia limitu emisji dwutlenku węgla, który dla testu NEDC w roku 2008 wynosić będzie 140 g/km, a w roku 2010 120 g/km. Aby spełnić te wymagania niezbędne jest wprowadzenie nowych rozwiązań znacznie ograniczających zużycie paliwa. Obecnie najbardziej efektywna metoda prowadząca do spełnienia tych wymagań jest określana w literaturze terminem „downsizing”. Polega ona na zmniejszeniu objętości skokowej silnika, a wymagane wartości momentu obrotowego i mocy są osiągane dzięki doładowaniu. W artykule dokonano przeglądu obecnie stosowanych konstrukcji silników, w których zastosowano „downsizing”. Zestawiono niektóre dane techniczne najnowszych pojazdów z tego typu silnikami.

Słowa kluczowe: samochód, silnik spalinowy, zużycie paliwa

Downsizing – a new direction of automobile engine development

The European Automotive Industry is facing the challenge to reduce the CO₂ emissions in the NEDC to 140 g/km in year 2008 and to 120 g/km in year 2010. In order to comply with those requirements, the introduction of fuel-efficient technologies is mandatory. Downsizing is a known way to reduce part load fuel consumption by combining significant displacement reduction with turbocharging, to achieve equivalent torque and power levels. The review of contemporary applied downsizing systems for combustion engines has been presented in article. The technical data of the chosen newest vehicles with downsizing systems have been also compared.

Key words: vehicle, combustion engine, fuel consumption

Niezwykle ważnym problemem w rozwoju silników spalinowych jest emisja dwutlenku węgla, która jest bezpośrednio związana z wielkością zużycia paliwa. W myśl założeń Europejskiego Związku Producentów Samochodów ACEA, do roku 2008 średnia emisja dwutlenku węgla dla produkowanych pojazdów powinna zostać ograniczona do wartości 140 g/km, co odpowiada średniemu zużyciu paliwa wynoszącemu 5,8 dm³/100 km. Założenie to wychodzi naprzeciw ustaleniom Komisji Europejskiej, która od 2010 roku zamierza wprowadzić limit średniej emisji dwutlenku węgla wynoszący 120 g/km.

W związku z tym producenci silników szukają rozwiązań, które sprostają postawionym wymaganiom. Jednym z nich jest najnowsza tendencja w rozwoju samochodowych silników spalinowych określana w literaturze terminem *downsizing*. W praktyce termin ten oznacza zmniejszenie wymiarów głównych silnika, a w konsekwencji jego objętości skokowej, przy zachowaniu podstawowych wskaźników pracy. Zabieg taki możliwy jest jedynie przy zwiększonych wartościach wskaźników jednostkowych, tzn. odniesionych do jednostki objętości skokowej lub do jednego cylindra. W taki sposób uzyskuje się zmniejszenie zużycia paliwa i emisji dwutlenku węgla, a także ograniczenia emisji pozostałych, toksycznych składników spalin.

Downsizing dotyczy zarówno silników o zapłonie iskrowym, jak i o zapłonie samoczynnym, a jego charakterystyczną cechą jest stosowanie nowoczesnego systemu doładowania. W literaturze [6, 7], dla celów porównawczych oraz do oceny tej nowej metody w budowie silników, przyjmuje się tzw. *współczynnik downsizingu* [6], który określa stopień względnego zmniejszenia objętości skokowej silnika, przy zachowaniu podobnej mocy i podobnych osiągnięć pojazdu.

Emission of carbon dioxide – related directly to the level of fuel consumption – is a very important problem in combustion engine development. According to the assumptions of the European Association of Automobile Producers – ACEA the average emission of carbon dioxide for the produced automobiles should be limited by the year 2008 to the volume of 140 g/km, which corresponds to the average fuel consumption of 5,8 dm³/100 km. This assumption meets the arrangements laid down by the European Committee intending to introduce the limit of average carbon dioxide emission to 120 g/km by the year 2010.

The producers of automobile engines are, thus, looking for solutions which would help meet these requirements. One of them is the recent trend in automobile combustion engine development defined in professional publications as “*downsizing*”. This means reducing the size of the engine and consequently its cylinder capacity while maintaining the basic work parameters. Such a procedure is possible only at increased values of unitary parameters i.e. referred to the unit of cylinder capacity or to one cylinder. In such a way not only do we obtain lower fuel consumption and carbon dioxide emission but also reduction of emission of the other exhaust gas components.

Downsizing concerns both spark ignition engines and diesel engines and their characteristic feature is the application of a modern supercharging system. For the sake of comparison and evaluation of this new method in engine structure the so called *coefficient of downsizing* is adopted in professional publications [6, 7]; this determines the degree of relative cylinder capacity decrease while maintaining similar power and vehicle performance.

W praktyce stosowany jest tzw. dynamiczny lub statyczny *downsizing* [6].

Pierwsza z metod polega na zmniejszeniu objętości skokowej silnika przez odłączanie poszczególnych cylindrów. Jest ona obecnie stosowana tylko w nielicznych przypadkach i dotyczy głównie wielocylindrowych silników o dużej objętości skokowej, a jej efektem może być zmniejszenie zużycia paliwa o około 5%.

Znacznie częściej stosowany jest tzw. *statyczny downsizing*, polegający na zmniejszeniu głównych wymiarów silnika oraz często, ograniczeniu liczby cylindrów. Metoda ta, przynosi zmniejszenie zużycia paliwa nawet do 20% i w opinii wielu specjalistów ma szansę stać się obecnie obowiązującym standardem w projektowaniu nowych jednostek napędowych.

Oprócz zmniejszenia objętości skokowej *statyczny downsizing* wiąże się także z opracowaniem odpowiedniego systemu doładowania, gwarantującym korzystny przebieg charakterystyki silnika oraz z doбором odpowiednich materiałów konstrukcyjnych, zdolnych przenieść znacznie większe mechaniczne i termiczne obciążenie głowicy, tulei cylindrowych i układu korbowo-łokowego. Znacznie wzrastają również wymagania dotyczące działania układu chłodzenia silnika.

Uzyskane efekty obniżenia zużycia paliwa wynikają głównie z przeniesienia zakresu eksploatacji silnika z przedziału małych i średnich obciążeń do przedziału dużych obciążeń, gdzie sprawność ogólna silnika osiąga największą wartość. Ponadto przy zmniejszonej objętości skokowej występują mniejsze straty ciepłne, wynikające z mniejszej powierzchni wymiany ciepła i mniejszej objętości płynu w układzie chłodzenia silnika. Przynosi to istotne efekty zwłaszcza w fazie nagrzewania, podczas której odnotowano znaczne zmniejszenie zużycia paliwa i obniżenie emisji toksycznych składników spalin, wynikające ze znacznie szybszego osiągnięcia prawidłowej temperatury pracy reaktora katalitycznego.

Zmniejszona objętość skokowa umożliwia również zmniejszenie strat tarcia, zwłaszcza w silnikach, które zastąpiły jednostki o większej liczbie cylindrów. Jednocześnie znacząco zmniejszyła się masa i wymiary tego typu jednostek napędowych, w stosunku do tradycyjnych silników o większej liczbie cylindrów i większej objętości skokowej. Zwarta budowa silnika o mniejszej liczbie cylindrów pozwala też na zmniejszenie akustycznych efektów jego pracy.

Silniki o zapłonie iskrowym

Downsizing stwarza ogromne możliwości tworzenia całej gamy silników przeznaczonej dla różnych typów pojazdów, przy wykorzystaniu jednej koncepcji i tej samej linii produkcyjnej. Zasadnicze elementy konstrukcyjne poszczególnych wersji nie różnią się wiele, natomiast różnice dotyczą jakości materiału oraz regulacji, w tym szczególnie ciśnienia doładowania, faz rozrządu oraz oprogramowania modułów sterujących.

Jednym z przykładów tego typu silnika jest jednostka o objętości skokowej 1,8 dm³ (rys. 1), montowana w modelach różnej klasy marki Audi, Seat, Skoda i Volkswagen. Jest to czterocylindrowy silnik o pięciu zaworach sterujących wy-

W practice, the so called dynamic or static *downsizing* is applied [6].

The first method is based on decreasing the cylinder capacity of the engine by reducing the number of cylinders. At present, disabling of the cylinders is applied only in few cases and concerns mainly multi-cylinder engines of high capacity, which results in fuel consumption decrease by about 5%.

Much more frequently the so called *static downsizing* is applied. It is based on reduction of the main size of the engine, and often, the number of cylinders. This method gives a fuel consumption decrease up to 20% and, according to the experts' opinion, may become a binding standard in designing new drive units.

Apart from the decrease in cylinder capacity *static downsizing* is also connected with elaboration of a proper supercharging system which would guarantee advantageous engine characteristics and choice of proper structural materials able to withstand much higher mechanical and thermal loads of the head, cylinder sleeves and the crank-piston assembly. Requirements concerning the functioning of the engine cooling system increase as well.

The obtained reduction in fuel consumption results mainly from shifting of the engine range of operation from small and medium loads to heavy loads, where the general engine efficiency reaches the highest value. Moreover, at a decreased cylinder capacity there appear smaller thermal losses, which results from a smaller area of heat exchange and smaller liquid volume in the cooling system. This gives significant effects especially during the warm up phase when a considerable decrease in fuel consumption and emission of toxic components was recorded, resulting from quick attainment of proper temperature by the catalytic reactor.

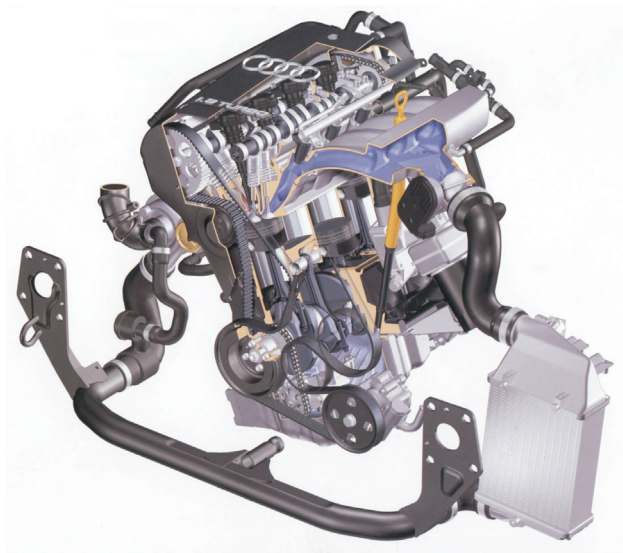
A decreased cylinder capacity lowers the friction losses especially in engines replacing units of higher cylinder number. At the same time the mass and dimensions of this type of a drive unit decrease considerably, as compared to traditional engines of higher cylinder number and greater cylinder capacity. A compact structure of the engine of a smaller number of cylinders minimizes the acoustic effects of its work.

Spark ignition engines

Downsizing gives immense possibilities of creating a huge range of engines designed for various types of vehicles using one concept and the same production line. The basic structural elements of particular versions do not differ greatly, whereas, differences concern the quality of material and alignment, especially with regard to the supercharging pressure, timing angles and programming of control modules.

One of the examples of this type of engines is a 1,8 dm³ unit (Fig. 1), fitted in models of various classes of Audi, Seat, Skoda, and Volkswagen. It is a 4 cylinder engine with 5 valves controlling charge exchange in each cylinder; at present it is offered in seven versions: 92, 110, 120, 125, 132, 140 and 165 kW [1]. A high torque value in a wide r.p.m. range (Fig. 2) is a characteristic feature of each of these versions.

mianą ładunku w każdym z cylindrów, który obecnie oferowany jest w siedmiu wersjach o mocach: 92, 110, 120, 125, 132, 140 i 165 kW [1]. Charakterystyczną cechą każdej z wersji jest duża wartość momentu obrotowego w szerokim zakresie prędkości obrotowej (rys. 2).



Rys. 1. Przekrój turbodoładowanego silnika 1,8 dm³ [1]

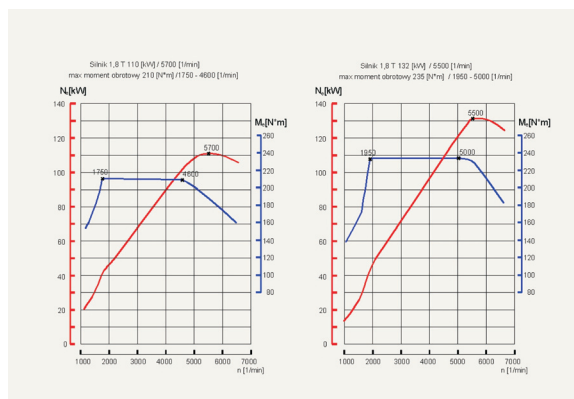
Fig. 1. Cross-Section of a supercharged engine 1.8 dm³ [1]

Dokonując porównania parametrów eksploatacyjnych modelu Audi A4, wyposażonego w wersję tego silnika o mocy 120 i 140 kW, z montowaną w tym modelu jednostką V6 o podobnych parametrach, należy podkreślić znaczną przewagę jednostki czterocylindrowej, zarówno pod względem osiągnięć pojazdu, jak i zużycia paliwa i emisji CO₂ (tab. 1).

Tablica 1. Porównanie parametrów eksploatacyjnych samochodu marki Audi A4 wyposażonego w wybrane wersje turbodoładowanego silnika $V_{ss} = 1,8 \text{ dm}^3$, z parametrami wersji wyposażonej w silnik V6 $V_{ss} = 2,4 \text{ dm}^3$ [1]

Table 1. Comparison of operating parameters of Audi A4 equipped with selected versions of a supercharged engine $V_{ss} = 1,8 \text{ dm}^3$ with parameters of a version equipped with V6 engine $V_{ss} = 2,4 \text{ dm}^3$ [1]

Audi A4	1,8 Turbo (120 kW)	1,8 Turbo (140 kW)	V6 2,4 dm³
Liczba cylindrów	4	4	6
Obj. skokowa silnika	1781 cm³	1781 cm³	2394 cm³
Moc efektywna	120 kW/ 5700 1/min	140 kW/ 5700 1/min	125 kW/ 6000 1/min
Maks. moment obrotowy/ przy prędk. obrot. 1/min	225 N·m / 1950-4800 1/min	240 N·m / 1950-4800 1/min	230 N·m / 3200 1/min
Czas rozp. 0-100 km/h	8,6 s	8,2 s	8,8 s
Prędkość maks.	226 km/h	237 km/h	226 km/h
Zużycie paliwa NEDC			
Cykl miejski	11,3 dm³/100 km	11,8 dm³/100 km	13,6 dm³/100 km
Cykl pozamiejski	6,4 dm³/100 km	6,7 dm³/100 km	7,5 dm³/100 km
Średnio w teście	8,2 dm³/100 km	8,6 dm³/100 km	9,6 dm³/100 km
Emisja CO ₂ (NEDC)	199 g/km	209 g/km	238 g/km



Rys. 2. Porównanie charakterystyk prędkościowych dwóch wybranych wersji turbodoładowanego silnika 1,8 dm³ o mocy 110 i 132 kW [1]

Fig. 2. Comparison of speed characteristics of two selected versions of turbo-supercharging engine 1,8 dm³ of 110 and 132 kW power [1]

Comparing the operating parameters of Audi A4 equipped with versions of an engine of 120 and 140 kW with a built in V6 unit of similar parameters, indicates considerable advantage over a 4 cylinder unit in vehicle performance, fuel consumption, and CO₂ emission (Table 1).

A similar strategy was applied by Daimler-Chrysler where various models of Mercedes-Benz were equipped with 1,8 dm³ engines (Fig. 3); this is offered in four versions: 105, 120, 125 i 141 kW. All versions were equipped with mechanical supercharging, and the version of 125 kW was additionally equipped with direct fuel injection. These engines are alternatively applied in traditional V6 units of greater cylinder capacity. To obtain good engine work, not worse than that of V6, balancing of inertia forces with Lanchester's mechanism was applied [5].

When introducing *downsizing* Mercedes-Benz departed from the traditional way of denoting its models with a symbol determining the cylinder capacity of the engine. The symbols used now such as C230 (a 4 cylinder 1,8 dm³ engine of 141 kW) or C240 (engine V6 2,6 dm³ of 125 kW) define real possibilities of the applied drive unit and not its cylinder capacity.

The analysis of operating parameters of the presented version of a model of class C shows excellent parameters of version C200 CGI with direct fuel injection and supercharging mechanism which, in performance, is not at all worse than the V6 engine, but its fuel consumption is decidedly lower and the engine emits much smaller amounts of carbon dioxide.

Tablica 2. Porównanie parametrów eksploatacyjnych samochodu marki Mercedes-Benz klasy C wyposażonego w różne wersje doładowanego silnika $V_{ss} = 1,8 \text{ dm}^3$, z parametrami wersji wyposażonej w silnik V6 $V_{ss} = 2,6 \text{ dm}^3$ [4]

Table 2. Comparison of operating parameters of Mercedes-Benz class C equipped with selected versions of a supercharged engine $V_{ss} = 1,8 \text{ dm}^3$ with parameters of a version equipped with V6 engine $V_{ss} = 2,6 \text{ dm}^3$ [4]

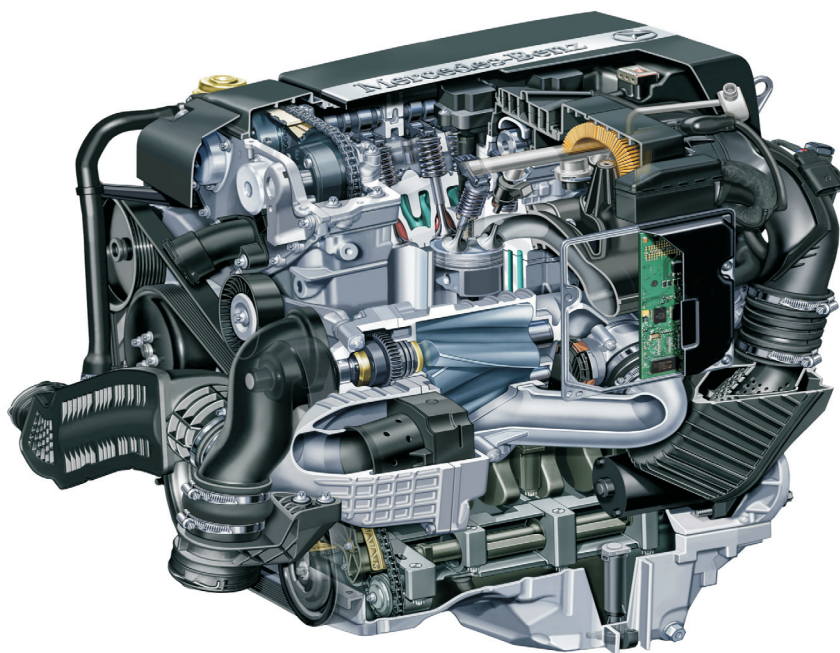
Mercedes-Benz	C180 Kompressor	C200 Kompressor	C200 CGI	C230 Kompressor	C240
Liczba cylindrów	4	4	4	4	6
Obj. skokowa silnika	1796 cm ³	1796 cm ³	1796 cm ³	1796 cm ³	2597 cm ³
Rodzaj zasilania	wtrysk pośredni, doładow. mechan.	wtrysk pośredni, doładow. mechan.	wtr. bezpośredni, doładow. mechan.	wtrysk pośredni, doładow. mechan.	wtrysk pośredni, bez doładowania
Moc efektywna	105 kW/5200 1/min	120 kW/5500 1/min	125 kW/5300 1/min	141 kW/5800 1/min	125 kW/5500 1/min
Maks. moment obrot./ przy prędk. obrotowej	220 N·m / 2500-4200 1/min	240 N·m / 3000-4000 1/min	250 N·m / 3000-4500 1/min	260 N·m / 3500-4000 1/min	240 N·m / 4500 1/min
Czas rozp. 0-100 km/h	9,7 s	9,1 s	9,0 s	8,1 s	9,2 s
Predkość maks.	223 km/h	234 km/h	235 km/h	240 km/h	235 km/h
Zużycie paliwa NEDC					
Cykl miejski	11,4 dm ³ /100 km	12,6 dm ³ /100 km	11,1 dm ³ /100 km	12,6 dm ³ /100 km	16,0 dm ³ /100 km
Cykl pozamiejski	5,9 dm ³ /100 km	6,5 dm ³ /100 km	5,9 dm ³ /100 km	6,7 dm ³ /100 km	7,6 dm ³ /100 km
Średnio w teście	7,9 dm ³ /100 km	8,6 dm ³ /100 km	7,8 dm ³ /100 km	8,9 dm ³ /100 km	10,7 dm ³ /100 km
Emisja CO ₂ (NEDC)	190 g/km	207 g/km	187 g/km	214 g/km	257 g/km

Podobną strategię zastosowała firma DaimlerChrysler wyposażając różne modele marki Mercedes-Benz w silnik o objętości skokowej 1,8 dm³ (rys. 3), który oferowany jest w czterech różnych wersjach o mocach: 105, 120, 125 i 141 kW.

Wszystkie wersje wyposażone zostały w mechaniczne doładowanie, a wersja o mocy 125 kW ponadto w bezpośredni wtrysk benzyny. Silniki te są stosowane alternatywnie w stosunku do tradycyjnych jednostek V6 o większej objętości skokowej. Aby uzyskać odpowiednią kulturę pracy, nie gorszą niż silnika V6, w jednostce 4-cylindrowej zastosowano system wyrównowania sił bezwładności za pomocą mechanizmu Lanchestera [5].

Wprowadzając *downsizing* firma Mercedes-Benz odeszła od tradycyjnego sposobu oznaczania swych modeli symbolem określającym objętość skokową silnika. Obecnie stosowane symbole, jak np. C230 (silnik 4-cylindrowy 1,8 dm³ o mocy 141 kW), czy też C240 (silnik V6 2,6 dm³ o mocy 125 kW), określają teraz raczej rzeczywiste możliwości zastosowanej jednostki napędowej, a nie jej objętość skokową.

Analiza parametrów eksploatacyjnych przedstawionych wersji modelu klasy C, wskazuje na doskonałe parametry eksploatacyjne wersji C200 CGI z bezpośrednim wtryskiem paliwa i mechanicznym doładowaniem, która pod względem osiągnięć nie ustępuje wersji z silnikiem V6, natomiast zużywa zdecydowanie mniej paliwa i emituje znacznie mniej dwutlenku węgla.



Rys. 3. Przekrój doładowanego mechanicznie silnika 1,8 dm³ samochodu Mercedes-Benz [4]

Fig. 3. Section of a mechanically supercharged engine 1,8 dm³ of a Mercedes-Benz [4]

Downsizing as a method of decreasing fuel consumption has been in use by European car manufacturers only since 2000, while, in Japan engines of such kind have been produced since the early nineties. Especially popular are the turbo-supercharged spark ignition units offered by various Japanese producers and used for propulsion of small vehicles designed for city traffic (Table 3). In spite of different structure and different number of cylinders, the cylinder capacity 660 cm³ and maximum power of 47 kW of these en-

Tablica 3. Zestawienie wybranych parametrów silników produkcji japońskiej klasy 660 cm³, stosowanych w pojazdach miejskich oraz silników samochodu Smart [8, 9]Table 3. List of chosen parameters of Japanese engines of class 660 cm³ applied in city traffic participating vehicles and engines of automobile Smart [8, 9]

Producent/ Typ silnika	Liczba cyl./obj. skok./ D x S	Moc maks./ prędk. obrotowa	Maks. moment obr./ prędkość obrotowa	Masa pojazdu	Zużycie paliwa Test 10-15 Mode	Emisja CO ₂
Daihatsu JB-DET	4 / 659 cm ³ / 61,0 x 56,4 mm	47 kW 6000 1/min	110 N·m 3200 1/min	870 kg	18,0 km/dm ³ 5,5 dm ³ /100km	132 g/km
Daihatsu EF-DET	3 / 659 cm ³ / 68,0 x 60,5 mm	47 kW 6400 1/min	103 N·m 3200 1/min	850 kg	18,6 km/dm ³ 5,4 dm ³ /100km	129 g/km
Fuji Heavy EN07	4 / 658 cm ³ / 56,0 x 66,8 mm	47 kW 6000 1/min	103 N·m 3200 1/min	890 kg	17,0 km/dm ³ 5,9 dm ³ /100km	141 g/km
Honda E07Z	3 / 656 cm ³ / 66,0 x 64,0 mm	47 kW 6000 1/min	93 N·m 4000 1/min	860 kg	17,2 km/dm ³ 5,8 dm ³ /100km	139 g/km
Mazda K6A	3 / 658 cm ³ / 68,0 x 60,4 mm	47 kW 6500 1/min	106 N·m 3500 1/min	850 kg	17,4 km/dm ³ 5,7 dm ³ /100km	138 g/km
Mitsubishi 3G83	3 / 657 cm ³ / 65,0 x 66,0 mm	47 kW 6500 1/min	93 N·m 3500 1/min	850 kg	16,0 km/dm ³ 6,2 dm ³ /100km	150 g/km
Suzuki K6A	3 / 658 cm ³ / 68,0 x 60,4 mm	47 kW 6500 1/min	106 N·m 3500 1/min	780 kg	19,6 km/dm ³ 5,1 dm ³ /100km	122 g/km
Smart smart&pure	3 / 698 cm ³ / 66,5 x 67,0 mm	37 kW 5250 1/min	80 N·m 1800 1/min	730 kg	NEDC 4,7 dm ³ /100km	113 g/km
Smart smart&pulse	3 / 698 cm ³ / 66,5 x 67,0 mm	45 kW 5250 1/min	95 N·m 2000 1/min	730 kg	NEDC 4,7 dm ³ /100km	113 g/km
Smart roadster	3 / 698 cm ³ / 66,5 x 67,0 mm	60 kW 5250 1/min	110 N·m 2250 1/min	790 kg	NEDC 5,0 dm ³ /100km	120 g/km
Smart crossblade	3 / 599 cm ³ / 63,5 x 63,0 mm	52 kW 5470 1/min	100 N·m 3210 1/min	740 kg	NEDC 5,4 dm ³ /100km	130 g/km

Downsizing, jako metoda obniżania zużycia paliwa, stosowany jest przez europejskich producentów dopiero od roku 2000, natomiast w Japonii silniki tego typu produkowane są już od początku lat 90. Szczególnie popularne są tu turbodoładowane jednostki o zapłonie iskrowym, oferowane przez różnych japońskich producentów i stosowane do napędu niedużych pojazdów miejskich (tab. 3). Mimo różnej konstrukcji oraz różnej liczby cylindrów, silniki te mają jednakową objętość skokową wynoszącą 660 cm³ oraz moc maksymalną 47 kW, co wynika z obowiązujących w Japonii preferencji podatkowych. Jedynym, podobnej klasy pojazdem produkcji europejskiej, w którym stosowany jest *downsizing*, jest obecnie Smart.

Podane w tablicy 3 wartości zużycia paliwa odnoszą się do obowiązującego w Japonii testu 10-15 Mode [8], natomiast dla pojazdów marki Smart są to średnie wartości z testu NEDC [9]. Za wyjątkiem Suzuki i Smarta, wszystkie pozostałe pojazdy wyposażone są w 4-stopniową, automatyczną skrzynię biegów, co ma wpływ na wartość zużycia paliwa.

Silniki o zapłonie samoczynnym

W silnikach o zapłonie samoczynnym „*downsizing*” stosowany jest powszechnie dopiero od 2002 roku, po szerokim wprowadzeniu nowoczesnych, wysokociśnieniowych systemów zasilania, takich jak system *Common Rail* lub elektronicznie sterowane pompowtryskiwacze.

Najbardziej rozpowszechnionym silnikiem tego typu jest jednostka 1,9 TDI firmy Volkswagen, która obecnie oferuje-

gines is equal; this results from the Japanese tax preferences. The only similar vehicle of European production in which *downsizing* is applied is at present the Smart car.

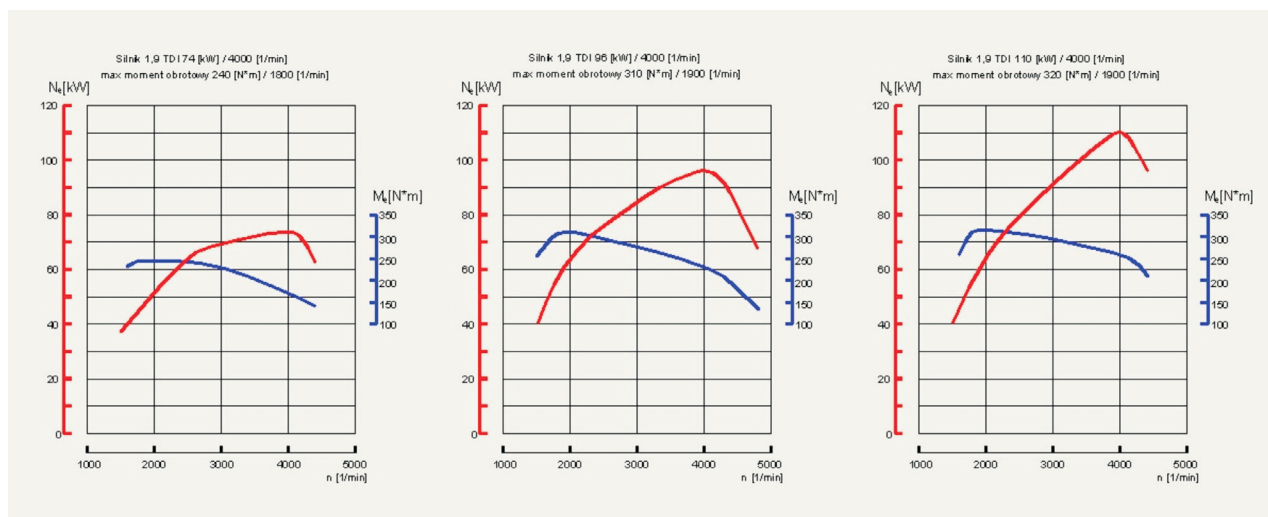
The values of fuel consumption given in (Table 3) refer to the test 10-15 Mode [8] compulsory in Japan, whereas, for all Smart vehicles the values are the average from the NEDC test [9]. With exception of Suzuki and Smart all the other vehicles are equipped with a 4 speed automatic gear box influencing the fuel consumption.

Diesel engines

In diesel engines *downsizing* has been commonly applied only since 2002 after the introduction of a new, high-pressure feeding systems: the *Common Rail* system and electronically controlled pump injectors.

The most popular engine of this type is the 1,9 TDI Volkswagen unit which is, at present offered in versions: 66, 74, 77, 85, 96 and 110 kW (Fig. 4).

As far as the structure is concerned, the particular versions do not differ from one another: the versions of highest power, however, have been equipped with a more effective engine cooling system, a different type of flywheel, bigger air cooler. The block crankshaft, pistons and cranks have been made of a different kind of material. Such tested and reliable drive unit is fitted in several vehicle models and, independent of the version, guarantees very good performance at an exceptionally small fuel consumption.



Rys. 4. Porównanie charakterystyk prędkościowych trzech wybranych wersji silnika 1,9 TDI firmy Volkswagen [1]

Fig. 4. Comparison of speed characteristics of three selected versions of 1,9 TDI Volkswagen engine [1]

na jest w odmianach o mocach: 66, 74, 77, 85, 96 i 110 kW (rys. 4).

Pod względem konstrukcyjnym poszczególne wersje nie różnią się od siebie, przy czym najmocniejszą wersję wyposażono w bardziej wydajny system chłodzenia silnika, innego typu koło zamachowe, większą chłodnicę powietrza a kadłub, wał korbowy, tłoki i korbowody wykonane zostały z innego rodzaju materiału. Ta sprawdzona jednostka

A unit of cylinder capacity $V_{ss} = 1248 \text{ cm}^3$ and power 51 kW produced in the Polish factory Fiat-GM Powertrain at Bielsko-Biała (Fig. 5) is now one of the most up-to-date self ignition engines in which *downsizing* was applied. This engine is characterised by a very low weight of 130 kg and compact uniform outer dimensions (460 x 500 x 650 mm); thus it was designed for propulsion of various car models of the B segment offered by: Fiat, Lancia, Opel, Subaru and Suzuki.

Average fuel consumption for Opel Corsa or Fiat Punto fitted with this engine type is in the NEDC test, on the average, 4,5 dm³ of diesel oil per 100 km and the said cars are, at present, the most economical, popular vehicles available in the market.

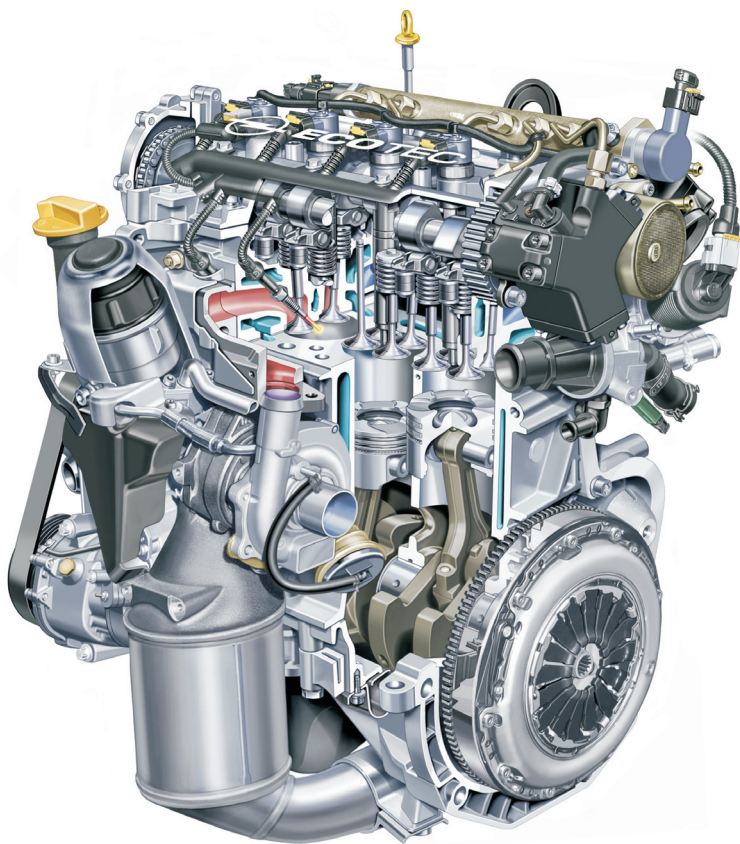
The development potential of this engine has not been, as yet, totally explored which was confirmed by the 2003 presentation of a prototype of a sport car – Opel Eco Speedster, equipped with a version of this engine of 82 kW power (Table 4, Fig. 6).

At present, many producers prepare diesel engines of a new generation, characterised by smaller cylinder capacity. One of such examples is the most recent 1,6 dm³ engine developed in cooperation with PSA (Peugeot, Citroën) and Ford.

In relation to the engine 2,0 HDi, currently applied by the PSA Concern, this engine is characterised by smaller outer dimensions, dead mass lower by 40 kg which guarantee, at the same time, similar performances at a lower fuel consumption (Table 5).

Downsizing is a trend still of considerable reserves to be explored. It is evidenced by the prototype of a two-stroke diesel engines TOPAZ 2CDDI, presented at the end of 2003 by the Daihatsu (Fig. 7). It is an in-line two-cylinder engine of 659 cm³ cylinder capacity designed for city traffic.

In this engine a longitudinal scavenging system of a cylinder, was introduced. It was equipped



Rys. 5. Przekrój turbodoładowanego silnika 1,3 dm³ Fiat-GM Powertrain [3]

Fig. 5. Section of a turbo supercharged engine 1,3 dm³ Fiat-GM Powertrain [3]

Tablica 4. Porównanie wybranych parametrów eksploatacyjnych silnika Fiat-GM Powertrain [3]

Table 4. Comparison of selected operating parameters of Fiat-GM Powertrain engine [3]

	Opel Corsa 1,3 CDTI	Opel Eco Speedster (prototyp)
Objętość skokowa	1248 cm ³	1248 cm ³
Średnica cylindra x skok tłoka	69,6 x 82 mm	69,6 x 82 mm
Stopień sprężania	18	16
Moc maks./prędkość obrotowa	51 kW/ 4200 1/min	82 kW / 4000 1/min
Maks. moment obr./prędk. obr.	170 N·m / 1750-2500 1/min	200 N·m / 2500-4000 1/min
Rodzaj zasilania	<i>Common Rail</i> Maks. ciśn. wtrysku 140 MPa Wtryskiwacz 5-otwinkowy	<i>Common Rail</i> Maks. ciśn. wtrysku 160 MPa Wtryskiwacz 6-otwinkowy
Chłodnica powietrza	Wymiennik powietrze/powietrze	Wymiennik powietrze/woda
Masa pojazdu	1075 kg	660 kg
Zużycie paliwa (test NEDC)	4,5 dm ³ / 100 km	2,5 dm ³ / 100 km
Emisja CO ₂ (test NEDC)	119 g/km	66,2 g/km

napędowa stanowi źródło napędu kilkunastu modeli pojazdów i niezależnie od wersji gwarantuje bardzo dobre osiągi przy wyjątkowo małym zużyciu paliwa.

Obecnie jednym z najnowocześniejszych silników o zapłonie samoczynnym na świecie wykorzystujących *downsizing* jest jednostka o objętości skokowej $V_{ss} = 1248 \text{ cm}^3$ i mocy 51 kW, produkowana w polskich zakładach Fiat-GM Powertrain w Bielsku-Białej (rys. 5). Silnik ten odznacza się małą masą własną wynoszącą 130 kg oraz zwartymi wymiarami zewnętrznymi (460 x 500 x 650 mm), dzięki czemu został przeznaczony do napędu różnych modeli samochodów segmentu B oferowanych przez firmy: Fiat, Lancia, Opel, Subaru i Suzuki. Średnie zużycie paliwa dla modeli Opel Corsa lub Fiat Punto wyposażonych w ten silnik wynosi w teście NEDC 4,5 dm³ oleju napędowego na 100 km i są to obecnie najoszczędniejsze, popularne pojazdy dostępne na rynku.

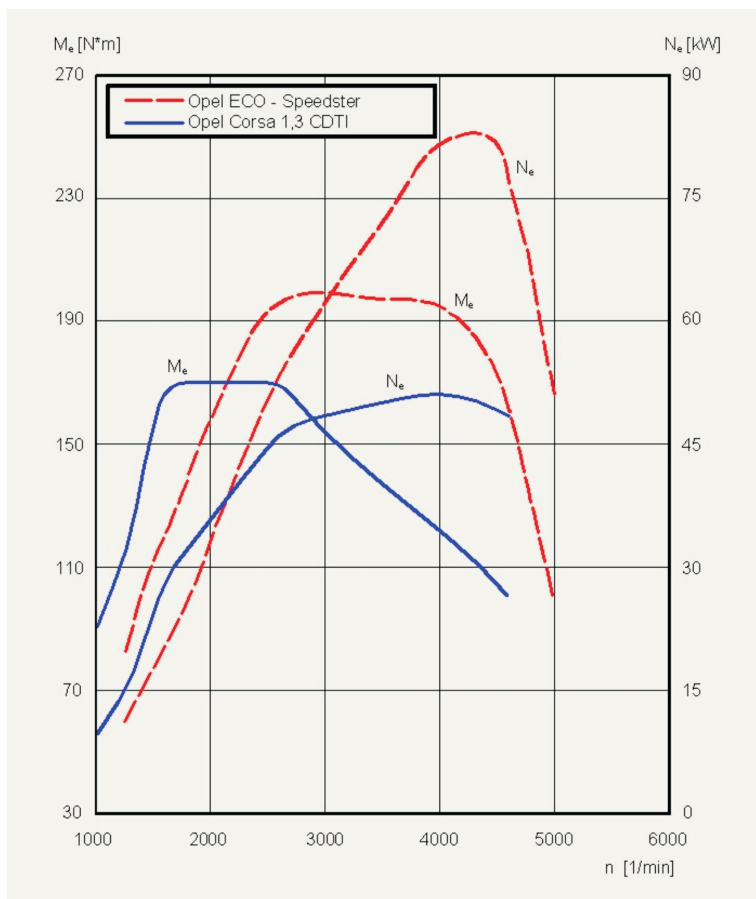
Potencjał rozwojowy tego silnika nie został jeszcze całkowicie wykorzystany, o czym świadczy prezentacja w 2003 roku prototypu sportowego pojazdu o nazwie Opel Eco Speedster, wyposażonego w odmianę tego silnika o mocy 82 kW (tab. 4, rys. 6).

Obecnie wielu producentów przygotowuje nowej generacji jednostki o zapłonie samoczynnym, charakteryzujące się zmniejszoną objętością skokową. Jednym z takich przykładów jest najnowszy silnik o objętości skokowej 1,6 dm³ opracowany przez firmy: PSA (Peugeot, Citroën) i Ford.

W stosunku do stosowanego dotąd w pojazdach koncernu PSA silnika 2,0 HDi, odznacza się on mniejszymi wymiarami zewnętrznymi, mniejszą o 40 kg masą własną, gwarantując jednocześnie podobne osiągi przy mniejszym zużyciu paliwa (tab. 5).

with specially shaped guide vanes – guaranteeing intensive air swirl in the cylinder – and four exhaust valves driven by two camshafts. With regard to great thermal load the valves were made of titanium alloy. The engine was equipped with a double supercharging system: a mechanically propelled compressor of the Roots type and a classical turbo-compressor as well as with an air cooler (air/liquid heat exchanger).

During start and within the range of small loads the air is

Rys. 6. Porównanie charakterystyk prędkościowych turbodoładowanego silnika 1,3 dm³ Fiat-GM Powertrain [3]Fig. 6. Comparison of speed characteristics of a turbo supercharged engine 1,3 dm³ Fiat-GM Powertrain [3]

supplied by a mechanical compressor, whereas, within the range of greater loads it is disconnected and its role is taken over by a turbo-compressor. In this engine a feeding system of the Common Rail type of maximum injection pressure 160 MPa and four-stage division of the injected fuel dose was

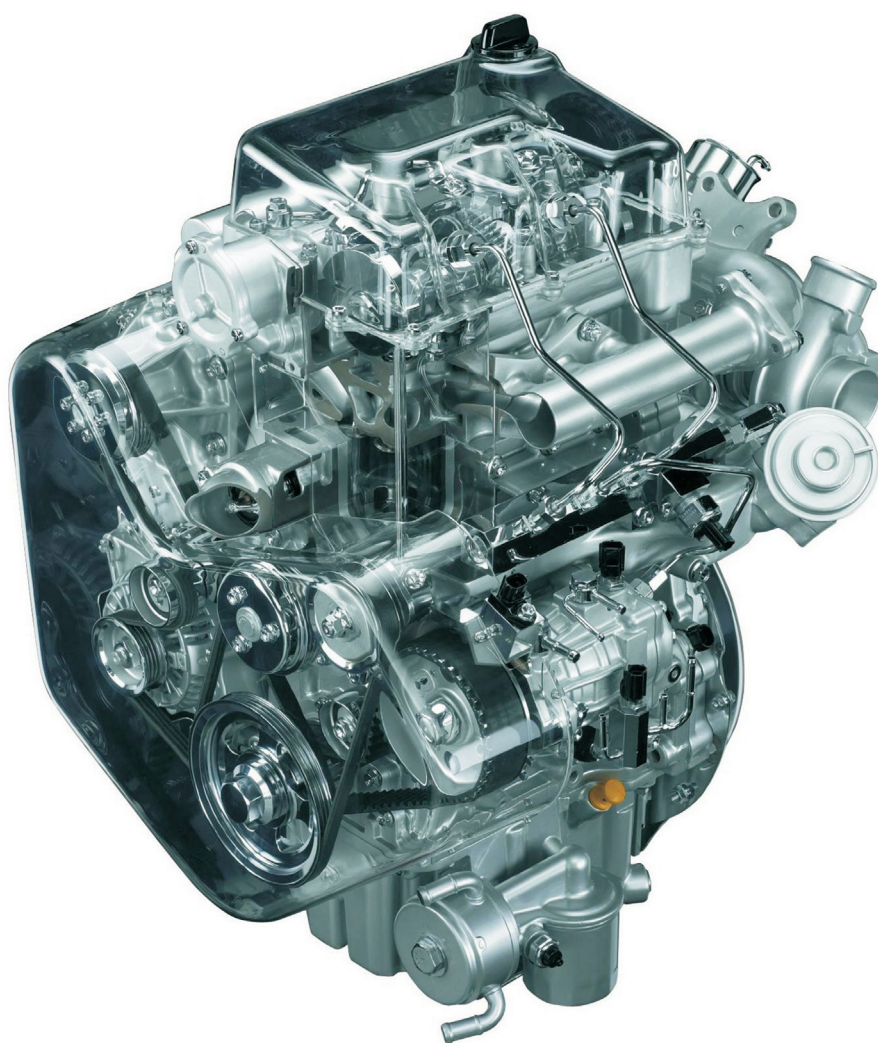
Downsizing jest metodą kryjącą w sobie jeszcze spore rezerwy do wykorzystania. Świadczy o tym prototyp dwusuwowego silnika o zapłonie samoczynnym o nazwie TOPAZ 2CDDI, jaki zaprezentowała pod koniec 2003 roku firma Daihatsu (rys. 7). Jest to rzędowy, 2-cylindrowy silnik dwusuwowy o objętości skokowej 659 cm³ przeznaczony dla pojazdu miejskiego.

W silniku tym zastosowano system wzdłużnego płukania cylindra, wyposażony w specjalnie ukształtowane kierownice gwarantujące silne

Tablica 5. Porównanie parametrów eksploatacyjnych samochodu marki Peugeot 307 SW wyposażonego w silnik 1,6 HDi, z parametrami wersji wyposażonej w silnik 2,0 HDi [9]

Table 5. Comparison of operating parameters of Peugeot 307 SW fitted with 1,6 HDi, with parameters of a version equipped with 2,0 HDi [9]

	Peugeot 307 SW 1,6 HDi	Peugeot 307 SW 2,0 HDi
Objętość skokowa	1560 cm ³	1997 cm ³
Średnica cylindra x skok tłoka	88,3 x 75 mm	85,0 x 88,0 mm
Stopień sprężania	17,9	17,6
Moc maks./prędkość obrotowa	80 kW / 4000 1/min	79 kW / 4000 1/min
Maks. moment obr./prędk. obr.	240 N·m / 1750 1/min	250 N·m / 1750 1/min
Zużycie paliwa (test NEDC)	5,1 dm ³ / 100 km	5,4 dm ³ / 100 km
Emisja CO ₂ (test NEDC)	136 g/km	143 g/km



Rys. 7. Przekrój dwucylindrowego, dwusuwowego silnika TOPAZ 2CDDI firmy Daihatsu [2]

Fig. 7. Section of a two-cylinder, two-stroke engine TOPAZ 2CDDI by Daihatsu [2]

zawieranie powietrza w cylindrze oraz w cztery zawory wylotowe w głowicy, napędzane dwoma wałkami rozrządu. Ze względu na duże obciążenie cieplne zawory wykonane zostały ze stopów tytanu. Silnik wyposażono w podwójny system doładowania: mechanicznie napędzaną sprężarkę typu

applied. This engine can develop maximum power of 40 kW at 3800 1/min and maximum torque 130 N·m at 1800 1/min. Connected with a CT gear box this engine was mounted in a four prototype vehicles used in town traffic whose mass was 570 kg. In the Japanese test 10-15 Mode fuel consumption by this vehicle was 2,4 dm³ of diesel oil per 100 km, which corresponds to CO₂ emission of 63,7 g/km [2].

Conclusions

In order to satisfy the requirements of the planned limitation of carbon-dioxide emission for automobile vehicles, fuel consumption must be drastically lowered. *Downsizing* is one of the methods; it permits a better use of the potential existing in the up to-date combustion engines and also puts to practice many known, but not yet applied, technical solutions.

Contemporary vehicles equipped with spark ignition engines do not reach, as yet, the carbon dioxide emission limits planned by ACEA for the year 2008 neither do they comply with the 2010 proposals of the European Commission (Fig. 8). Vehicles equipped with up-to-date diesel engines (Fig. 9) are much closer to satisfying these limits.

For both engines *downsizing* proved to be the best method leading to fulfillment of these requirements as the points in Figs. 8 and 9 placing closest to the levels representing the planned limits belong to vehicles equipped with such a type of drive units.

Roots oraz w klasyczną turbosprężarkę, a także w chłodnicę powietrza w postaci wymiennika powietrze/ciecz.

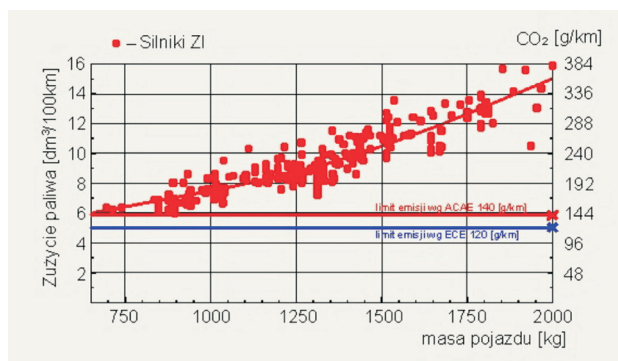
Podczas rozruchu oraz w zakresie małych obciążeń powietrze jest dostarczane przez sprężarkę mechaniczną, natomiast w zakresie większych obciążeń jest ona odłączana, a jej rolę przejmują turbosprężarka. W silniku tym zastosowano układ zasilania typu *Common Rail* o maksymalnym ciśnieniu wtrysku 160 MPa i czterostopniowym podziale dawki wtryskiwanego paliwa. Silnik ten rozwija moc maksymalną 40 kW przy 3800 1/min oraz maksymalny moment obrotowy 130 N·m przy 1800 1/min. W połączeniu z bezstopniową skrzynią biegów, silnik ten umieszczony został w 4-miejscowym, prototypowym pojeździe miejskim o masie 570 kg. W japońskim teście 10-15 Mode zużycie paliwa przez ten pojazd wynosi 2,4 dm³ oleju napędowego na 100 km, co odpowiada emisji dwutlenku węgla 63,7 g/km [2].

Podsumowanie

Aby spełnić wymagania związane z planowanymi limitami emisji dwutlenku węgla dla pojazdów samochodowych, należy radykalnie obniżyć zużycie paliwa. Jedną z metod zmierzających do tego jest *downsizing*, który pozwala na lepsze wykorzystanie potencjału tkwiącego we współczesnych silnikach spalinowych, a także na wdrożenie do praktyki wielu znanych, lecz niestosowanych dotąd rozwiązań technicznych.

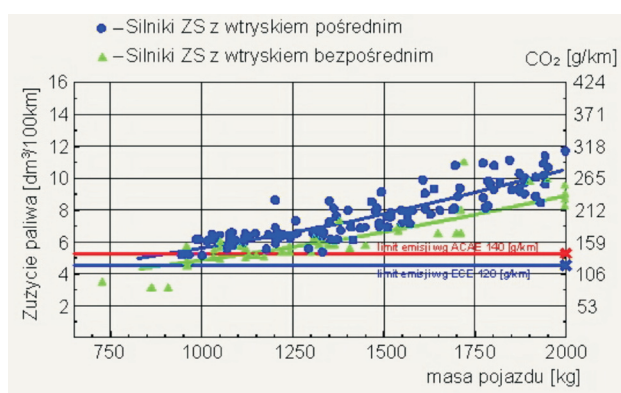
Współczesne pojazdy wyposażone w silniki ZI nie spełniają jeszcze limitów emisji dwutlenku węgla planowanych przez ACEA na rok 2008, ani też planowanych na 2010 rok ustaleń Komisji Europejskiej (rys. 8). Znacznie bliższe spełnienia tych limitów są pojazdy wyposażone w nowoczesne silniki ZS (rys. 9). Dla obu rodzajów silników najlepszą metodą spełnienia tych wymagań okazał się w tym względzie *downsizing*, ponieważ punkty na rys. 8 i 9 położone najbliżej linii wyznaczających planowane limity należą do pojazdów wyposażonych w tego typu źródła napędu.

Artykuł recenzowany



Rys. 8. Zużycie paliwa i emisja dwutlenku węgla dla wybranych pojazdów z silnikami ZI w teście NEDC [6, 7]

Fig. 8. Fuel consumption and carbon dioxide emission for selected vehicles with spark ignition engines in the test NEDC [6, 7]



Rys. 9. Zużycie paliwa i emisja dwutlenku węgla dla wybranych pojazdów z silnikami ZS w teście NEDC [6, 7]

Fig. 9. Fuel consumption and carbon dioxide emission for selected vehicles with self ignition engines in the test NEDC [6, 7]

Literatura/Bibliography

- [1] Fabryczne materiały prasowe – AUDI AG 2002, Volkswagen AG, 2002, 2003.
- [2] Fabryczne materiały prasowe – Daihatsu, The 60-International Motor Show Frankfurt 2003.
- [3] Fabryczne materiały prasowe – Adam Opel AG, 2003.
- [4] Fabryczne materiały prasowe – DaimlerChrysler Communication, Stuttgart 2003, 2004.
- [5] Der neue Mercedes-Benz 4-Zylinder-Ottomotor M 271 mit Aufladung, 23. Internationalen Wiener Motorensymposium, Wien, April 2002.
- [6] Pischinger St., Lang O., Koerfer T.: Downsizing als Verbrauchskonzept für zukünftige Dieselmotoren – Dresdener Motorenkolloquium, Dresden 2001.
- [7] Habermann K., Fieweger K., Rauscher M.: Aufladung von Ottomotoren als Massnahme zur Verbrauchsverbesserung – Haus der Technik Tagung, München, April 2000.
- [8] Automotive Guidebook of Japan, Vol. 49, 2002-2003.
- [9] Katalog der Automobile Revue 2003, 2004.

* Dr inż. Marek Brzeżański jest pracownikiem Instytutu Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych Politechniki Krakowskiej.

Mr Marek Brzeżański Ph.D. M.E. – Institute of Automobiles and Internal Combustion Engines, Cracow University of Technology.



** Dr inż. Krzysztof Śliwiński jest pracownikiem Instytutu Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych Politechniki Krakowskiej.

Mr Krzysztof Śliwiński Ph.D. M.E. – Institute of Automobiles and Internal Combustion Engines, Cracow University of Technology.

