

Jerzy MERKISZ*

Tendencje rozwojowe silników spalinowych

W artykule przedstawiono najnowsze tendencje w rozwoju silników spalinowych z uwzględnieniem aspektów ekologicznych. Opisano kierunki zmian ich konstrukcji w celu spełnienia drastycznych norm emisji spalin. Porównano emisyjność napędów wykorzystujących silniki spalinowe i przedstawiono kierunki dalszego ich rozwoju.

Słowa kluczowe: silnik spalinowy, ekologia

Some trends in the evolution of combustion engines

The paper presents latest trends in the evolution of the combustion engines and considers some of its ecological aspects. The trends have been analyzed for their effectiveness in the realization of the stringent emission levels. The emissions of combustion engines have been compared and developments in this respect have been demonstrated.

Key words: combustion engine, ecology

1. Wstęp

Przyjmuje się powszechnie, że historia tłokowych silników spalinowych rozpoczęła się w roku 1860, w którym belgijski inżynier Jean Joseph Etienne Lenoir opatentował silnik swojego pomysłu. Chociaż konstrukcje mniej lub bardziej zasługujące na miano silnika spalinowego pojawiały się już na początku XIX wieku, np. silnik szwajcara Isaaca de Rivaza, to jednak dopiero Lenoirovi udało się osiągnąć rynkowy sukces – w roku 1865 w Paryżu pracowało około 500 silników jego konstrukcji. Od tego czasu silniki spalinowe przeszły skomplikowany proces ewolucji i zupełnie nie przypominają swoich pierwowzorów (rys. 1). Obecnie także bardzo trudno jest odnieść sukces rynkowy, gdyż wymagania stawiane silnikom spalinowym są nieporównanie większe.

Silnik spalinowy jest podstawowym źródłem napędu pojazdów samochodowych. Napędy wraz z postępem cywilizacji ulegają różnicowaniu (rys. 2). Około roku 1900 konkurowały między sobą: napęd parowy, elektryczny i benzynowy. Napęd benzynowy „wyparł konkurentów”, co dało początek różnym nowym technologiom w XX wieku. Należy sądzić, że mimo wad, jeszcze przez wiele lat będzie w tej roli dominował. Silnik jest również tym elementem pojazdu, który podczas ostatnich lat uległ największemu rozwojowi – potencjalnie jest on źródłem największego niekorzystnego wpływu pojazdów na środowisko.

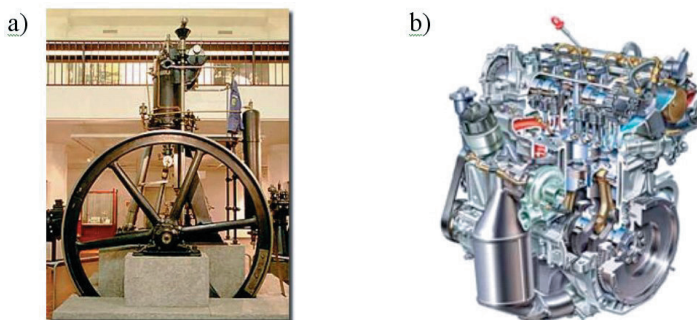
W przeszłości silniki spalinowe były konstruowane pod kątem możliwości uzyskiwania wysokich osiągnięć.

1. Introduction

It is a commonly accepted fact that the history of combustion engines began in 1860, when a Belgian engineer Jean Joseph Etienne Lenoir patented an engine of his own design. Even though, at the beginning of the 20th century other concepts appeared as well, such as the machine by a Swiss engineer Isaac de Rivaz, only Lenoir truly won the market – in 1865 in Paris there were already around 500 engines of his design. Ever since, the engines have gone through a very complex evolutionary process and today they have little in common with their predecessors (Fig. 1). Nowadays it is, too, quite hard to win the very demanding market as the requirements are way more stringent than those from the past.

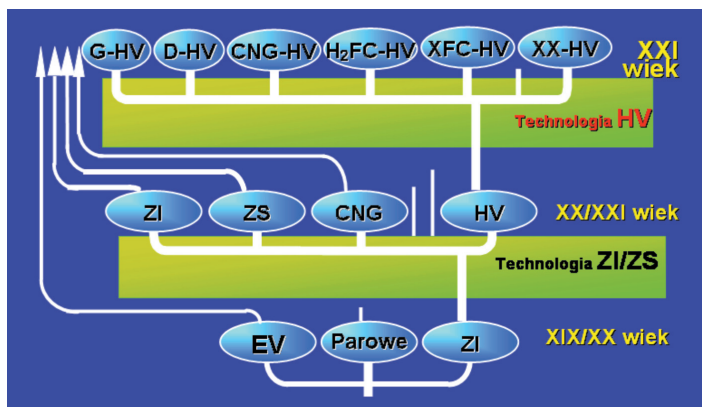
A combustion engine constitutes the basic drive unit in motor vehicles. Drive units, along with technology advancement, undergo a divergence process (Fig. 2). Around 1900 three main systems were competing for primacy – steam engines, electric motors and gasoline engines. The combustion engine has outtraced the others and gave way to new technologies of the 20th century. It is not a wrong supposition to state that apart from its drawbacks it is still doomed to prevail for years to come. The engine itself is also a vehicle component, which has undergone the most drastic technological changes in recent years – it is the potential source of the largest negative impact on the environment.

In the past, engines were



Rys. 1. Rozwój silników spalinowych: a) silnik Rudolfa Diesla zaprezentowany na Światowej Wystawie w Paryżu w roku 1900 (masa: 4500 kg, moc maksymalna: 15 kW); b) silnik Fiata 1,3 Multijet 16v zaprezentowany na Salonie Motoryzacyjnym w Genewie w roku 2003 (masa: 130 kg, moc maksymalna: 51 kW)

Fig. 1. Evolution of combustion engines: a) an engine by Rudolf Diesel presented at the World Show in Paris in 1900 (weight: 4500 kg, power output: 15 kW); b) an engine by Fiat 1,3 Multijet 16v presented at the Geneva Motor Show in 2003 (weight: 130 kg, power output: 51 kW)



Rys. 2. Ewolucja rozwoju napędów pojazdów [7]

Fig. 2. Vehicle drive evolution [7]

Aktualnie najważniejszym stimulatorem ich rozwoju jest niewielka uciążliwość dla środowiska naturalnego, czyli jak najmniejsza emisja substancji toksycznych i hałasu oraz małe zużycie paliwa (emisja dwutlenku węgla). Wymagania w zakresie właściwości ekologicznych silników są wysuwane zarówno przez urzędy ochrony środowiska, jak również przez samych użytkowników, co świadczy o wzroście świadomości ekologicznej społeczeństw.

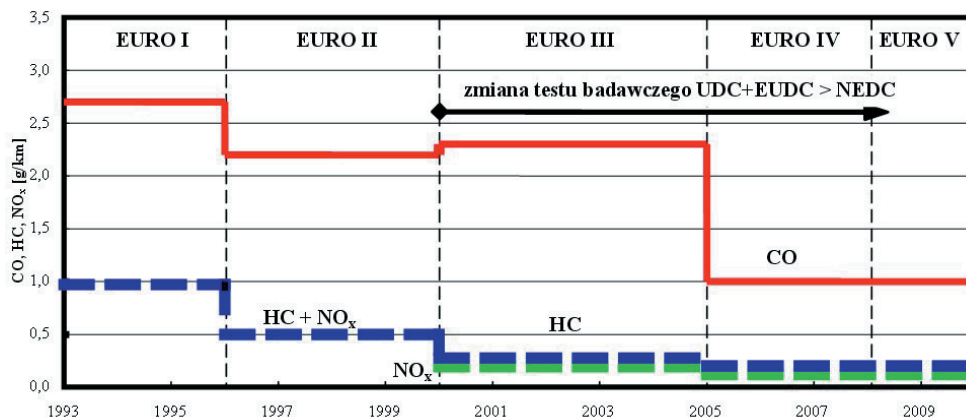
2. Rozwój silników ZI i ZS

Podstawowym czynnikiem decydującym współcześnie nie tylko o sukcesie rynkowym silnika, ale w ogóle o możliwości jego zaistnienia na rynku jest niska szkodliwość dla środowiska naturalnego. Coraz mniejsze limity emisji toksycznych składników spalin (rys. 3–5) i zużycia paliwa, a także duże wymagania ekologiczne dotyczące całego „cyklu życiowego” silnika (w tym recyklingu) zmuszają konstruktorów do stałego doskonalenia jego konstrukcji. Norma Euro VI dla silników ZS HDD przewiduje limity NO_x na poziomie 1,0 g/(kW·h), natomiast cząstek stałych (PM – Particulate Matter) na poziomie 0,002 g/(kW·h). Mimo bardzo dużego postępu, problem

designed so as to obtain the highest values in terms of their performance. Today the most vital factor influencing the design of contemporary engines is their impact on the environment, i.e. minimized toxic compounds and noise emission, let alone fuel economy (CO emission). The demands in terms of environment protection are put forward not only by environment protection agencies but the vehicle users themselves, which shows growth of ecological awareness within contemporary communities.

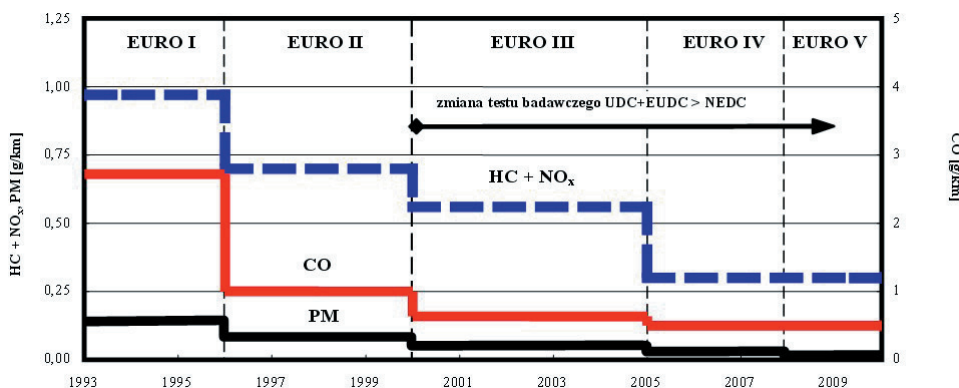
2. Evolution of SI and CI Engines

The very basic factor influencing not only market success but a successful product launch is low toxicity. Lower emis-



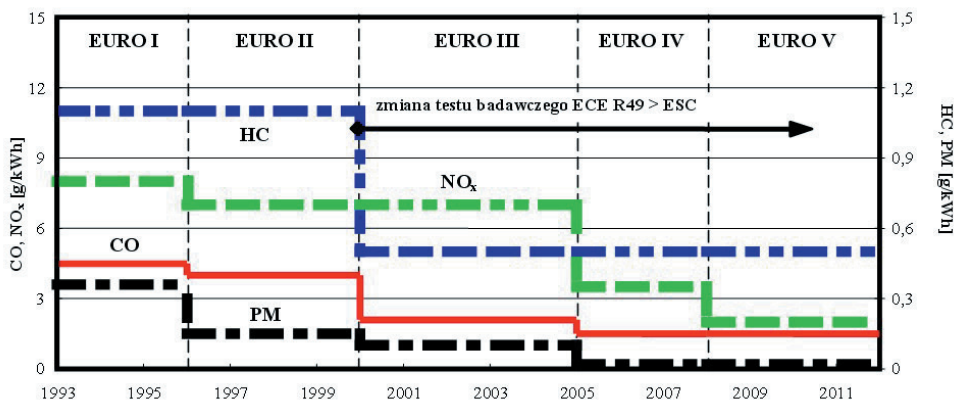
Rys. 3. Limity emisji związków toksycznych dla samochodów osobowych z silnikami ZI [2]

Fig. 3. Toxic compound emissions for SI passenger vehicles [2]



Rys. 4. Limity emisji związków toksycznych samochodów osobowych dla silników ZS LDD [2]

Fig. 4. Toxic compound emissions for CI LDD passenger vehicles [2]



Rys. 5. Limity emisji związków toksycznych dla silników ZS HDD [2]

Fig. 5. Toxic compound emissions for CI HDD passenger vehicles [2]

sion limits (Fig. 3–5) and fuel consumption as well as high ecological standards in relation to the whole engine life cycle (including recycling) have forced the designers to continuously perfect their products. The Euro VI standard for CI HDD engine sets the NO_x emission limits on the level of 1,0 g/(kW·h) and PM (Particulate Matter) on the level of 0,002 g/(kW·h). Despite a tremendous progress the problem of engine effect on the environment has still not been resolved. Even California, a leading environment protector globally, still wrestles with the health problems arising from engine toxic emissions.

The turn of the XX/XXI centuries will inevitably constitute a time of intense research and development works on vehicles of low or even zero emission, running on alternative fuels and employing unconventional drive units. The main rea-

oddziaływania silników na środowisko wciąż nie został rozwiązany. Nawet w Kalifornii, która jest światowym liderem w zakresie ochrony środowiska, straty zdrowotne wynikające z narażenia ludzi na spaliny silnikowe są nadal wysokie.

Przełom XX/XXI wieku przejdzie z pewnością do historii rozwoju motoryzacji jako okres intensywnych prac badawczo-rozwojowych nad pojazdami o niskiej lub wręcz zerowej emisji toksycznych składników spalin, zasilanych paliwami alternatywnymi i wykorzystującymi niekonwencjonalne źródła napędu. Głównym aspektem tych działań jest wzrastająca świadomość zagrożeń dla środowiska naturalnego – w jego obronie tworzą się akty prawne, określające poziomy dopuszczalnych emisji toksycznych składników spalin w określonych grupach i kategoriach pojazdów.

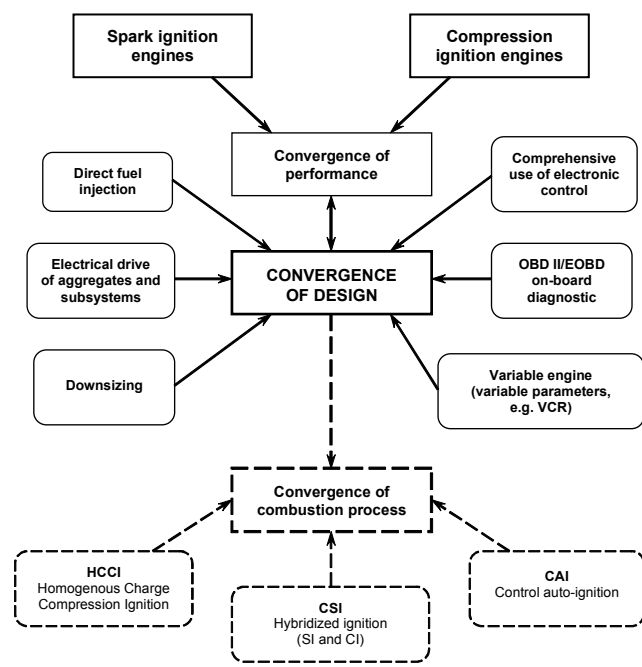
Wobec przewidywanego wzrostu liczby pojazdów na świecie oraz zapotrzebowania na paliwa silnikowe można sądzić, że globalna emisja spalin silnikowych będzie nadal wzrastać, a ekologiczna presja wywierana na producentów silników będzie się nasilać. Dla spełnienia wymagań ekologicznych nie wystarczają już pojedyncze środki – niezbędne są rozwiązania kompleksowe. Obserwuje się „zbliżenie” konstrukcyjne silników ZI i ZS, prowadzące do wykorzystania zalet i eliminacji wad obu typów silników. Obejmuje ono obecnie przede wszystkim rozwiązania konstrukcyjne (rys. 6), ale w przyszłości obejmie szczególnie proces spalania, czego przykładem są systemy spalania CAI (*Controlled Auto-Ignition* – sterowany samozapłon paliwa) i HCCI (*Homogenous Charge Compression Ignition*) – system spalania ładunku homogenicznego w silniku ZS (rys. 7).

W systemie HCCI paliwo jest wtryskiwane w kolektorze dolotowym, w celu uzyskania częściowej homogenizacji ładunku przed wystąpieniem spalania. Początkiem spalania steruje się na drodze pośredniej przez wpływ na parametry termodynamiczne ładunku (ujednorodnienie stężenia par paliwa, tak aby ich wartości w różnych miejscach komory spalania nie odbiegały od wartości średnich). Lokalnie muszą oczywiście

reason for such intensity is the increasing awareness of the environmental perils – so as to protect the environment, a variety of legal acts are being created that determine permissible emission levels for groups and categories of vehicles in particular.

Judging from the forecasted increase in vehicle number globally and the demand for engine fuels we may anticipate that global engine emissions will continue escalating and the environment related pressure exerted on the car manufacturers will grow. In order to meet the ecological requirements simple measures are no longer an option – complex solutions are indispensable. We are observing a convergence of SI and CI engines aiming at eliminating the low points and augmenting the advantages of both engines. This mainly pertains to the structural solutions (Fig. 6) but will, in the nearest future, focus on the combustion processes such as Controlled Auto-Ignition and Homogenous Charge Compression Ignition (Fig. 7).

In the HCCI system, the fuel is injected in the inlet manifold so as to obtain partial charge homogenization before combustion. The onset of combustion is controlled indirectly through interference in the thermodynamic parameters of the charge (homogenization of fuel vapor so as to ensure mean values all over the chamber. Locally there must be $\lambda < 1$ spots, if the self-ignition is to take place at all. Apart from this, it is unacceptable to allow heat formation as a result of homogenization, as it would lead to an excessive development of NO_x . During the whole cycle, the average temperature is to be lower than 2000 K, while there is more oxygen than necessary to burn the entire injected fuel dose. If the combustion process took place in the entire volume of the combustion chamber the temperatures would be too low for NO_x to form, and the excess oxygen would prevent the formation of PM. This method speeds up the combustion process and improves temperature distribution in the combustion chamber. It also enables burning large fuel doses simultaneously limiting the in-flame injection. The research centers focused on the development of the CAI and HCCI combustion indicate a need for developing brand new fuels – fuels that combine excellent evaporative properties with high self-ignition capacity.



Rys. 6. Zbliżenie konstrukcyjne silników o zapłonie iskrowym i samoczynnym

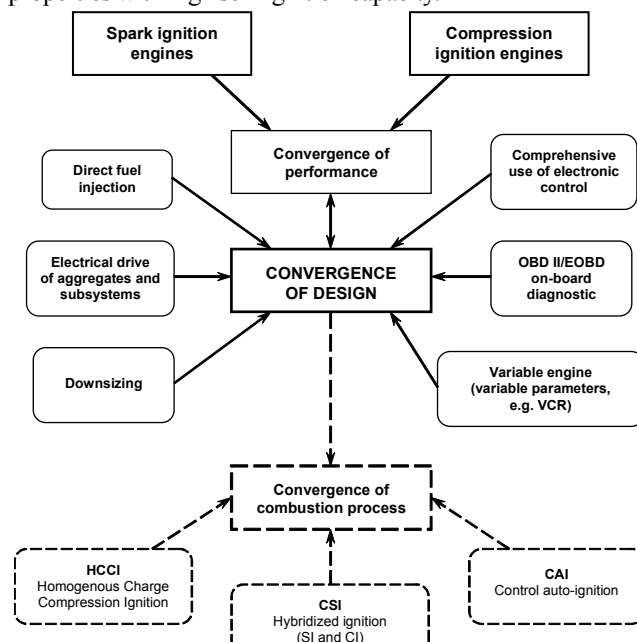
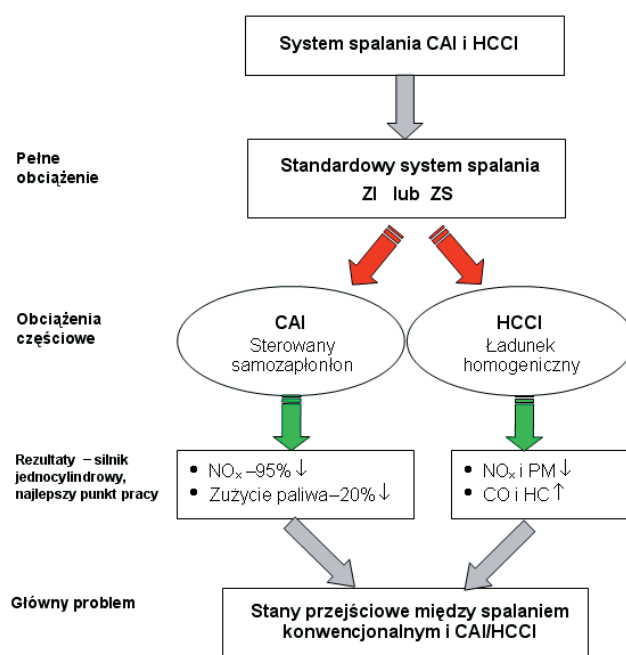


Fig. 6. CI and SI engine convergence

istnieć niewielkie strefy z $\lambda < 1$, aby w ogóle wystąpił samozapłon. Poza tym nie można dopuścić do wzrostu szybkości wywiązywania się ciepła w wyniku homogenizacji, bo spowodowałyby to intensywne tworzenie się tlenków azotu. Podczas całego obiegu średnia temperatura ma być niższa od 2000 K, a tlenku powinno być więcej niż potrzeba do całkowitego spalania wtrysniętej dawki paliwa. Jeżeli spalanie zachodziłoby więc w całej objętości komory spalania, panujące temperatury byłyby za niskie, aby mogły wytworzyć się NO_x , a dzięki dużemu nadmiarowi tlenu nie doszłoby do powstania PM. Metoda ta przyspiesza spalanie i polepsza rozkład temperatury w przestrzeni spalania, jednocześnie pozwala spalać duże dawki paliwa z ograniczeniem wtrysku paliwa do płomienia. Ośrodki rozwijające koncepcję spalania CAI i HCCI coraz częściej wskazują na potrzebę opracowania nowego paliwa, łączącego dobrą odparowalność z dużą zdolnością do samozapłonu.

Szybki rozwój układów zasilania silników ZI spowodował, że stosowany od prawie stu lat gaźnik zastąpiono najpierw układem wtrysku jednopunktowego SPI (*Single Point Injection*), a następnie wtrysku wielopunktowego MPI (*Multi Point Injection*) do kanału dolotowego, który obecnie dominuje. Od kilku lat jest stosowany z różnym powodzeniem bezpośredni wtrysk benzyny do cylindrów GDI (*Gasoline Direct Injection*), a oferta silników z tego typu układem zasilania stale się zwiększa. Badania nad bezpośrednim wtryskiem benzyny są prowadzone zasadniczo w dwu kierunkach. Pierwszy, przyjęty głównie przez konstruktorów japońskich (m.in. Mitsubishi, Toyota, Nissan), adaptowany z silników o zapłonie samoczynnym, polega na wtrysnięciu dawki benzyny do cylindra pod koniec suwu sprężania, gdy zawory dolotowe i wylotowe są zamknięte. W celu lepszego przygotowania mieszanki palnej, powietrze zasysane do cylindra jest rozpędzane w kanale dolotowym i wprowadzane w ruch wirowy przez specjalnie ukształtowane denko tłoka. Zaletą tego systemu jest możliwość spalania mieszanek bardzo ubogich, wadą – konieczność stosowania wysokich ciśnień wtrysku, problemy z redukcją tlenków azotu, rozbudowany układ neutralizacji składników toksycznych.

Drugie rozwiązanie bezpośredniego wtrysku benzyny, nad którym pracują konstruktorzy europejscy (m.in. Renault), opracowano na podstawie dobrze znanego i powszechnie stosowanego wtrysku wielopunktowego MPI, w którym paliwo jest wtryskiwane podczas suwu dolotu w okolicach zaworu dolotowego, a wpływające do cylindra powietrze porwya paliwo i się z nim miesza. Wtrysk bezpośredni rozwiązano podobnie, z tym że wtryskiwacz umieszczono w komorze spalania. Wtrysk paliwa rozpoczyna się w połowie suwu dolotu, przy otwartym zaworze dolotowym. Struga paliwa wpada na strumień powietrza wewnątrz cylindra. Praca wtryskiwaczy kończy się z chwilą zamknięcia zaworu. W tym systemie spalana w silniku mieszanka jest zawsze homogeniczna. Zalety takiego rozwiązania to: niskie ciśnienie wtrysku, długi czas wtrysku umożliwiający dokładne dozowanie dawki paliwa, bardzo dobre wymieszanie paliwa z powietrzem i stosowanie konwencjonalnego trójfunkcyjnego katalitycznego reaktora spalin oraz mniejsze wymagania do jakości paliwa. Wadami są: konieczność spalania mieszanek bogatszych niż we wcześniej opisanym rozwiązaniu, wymagany silny ruch wirowy mieszanki w cylindrze podczas sprężania, większa emisja węglowodorów, skomplikowany, wielozukonowy system sterowania pracą wtryskiwaczy.



Rys. 7. Systemy spalania CAI i HCCI

Fig. 7. CAI and HCCI Combustion systems

A rapid development of fuel systems in SI engines has led to a replacement of a long established carburettor, initially with a single point injection SPI, and then consequently with multi point injection MPI (currently prevailing). For some years, gasoline direct injection has also been applied in the engines with a moderate success in the market, but the variety of engines with this type of fuel system is getting larger. The research on gasoline direct injection is currently being carried out in two directions. The first, adopted by Japanese engineers (Mitsubishi, Toyota, Nissan) from diesel engines, is based on fuel injection at the end of the compression stroke, while the inlet and exhaust valves are closed. In order to prepare the mixture more efficiently, the inlet air gains speed in the inlet manifold and is put into a swirl thanks to a specially designed piston crown. The advantage of this system is the possibility to burn very lean mixtures; the disadvantages – the necessity to apply very high injection pressures, NO_x reduction problems and a complex exhaust gas aftertreatment system.

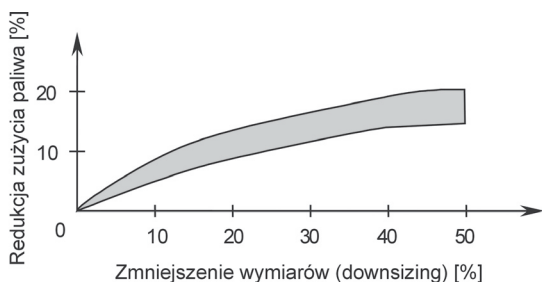
The second solution regarding gasoline direct injection, thoroughly researched by European engineers (Renault), is based on a well known multipoint injection, in which the fuel is injected during the inlet stroke in the immediate vicinity of the inlet valve, while the inlet air entrains the fuel and mixes with it. Gasoline direct injection has been developed similarly, only the injectors are located in the combustion chamber. The fuel injection is initiated halfway of the inlet stroke while the inlet valve remains open. The fuel jet strikes the air inside the combustion chamber. The work of the injectors is done after the inlet valves have been closed. The mixture in this system is always homogenous. The advantages of this system are: low injection pressure, long time of injection (enabling a very precise fuel dosage), very thorough fuel and air mix, the application of a conventional three-way catalytic converter and lower fuel quality requirements. The disadvantages are: the

Rozwój światowej motoryzacji musi mieć na względzie ochronę środowiska. Coraz większy nacisk kładzie się na zmniejszenie emisji CO₂; od roku 2008 limit zbiorczy emisji dla floty pojazdów osobowych danego producenta będzie wynosił 140 g/km, a od 2012 – 120 g/km (rys. 8). Dąży się do obniżenia nie tylko emisji CO₂ w spalinach pojazdu, ale w całym cyklu życia – *from well to wheel*. Zakłada się, że odpowiednia polityka legislacyjna umożliwi w ciągu najbliższych 20 lat obniżenie całkowitej emisji z pojazdów 3–5 razy. Służyć temu będzie między innymi wprowadzanie kolejnych norm emisji oraz integracja przepisów.

Dla pojazdów typu LDV w roku 2020 emisja CO₂ ma być ograniczona do wartości 95 g/km (limit dla floty pojazdów danego producenta), a w roku 2030 do 80 g/km. Przewiduje się, że emisja dwutlenku węgla dla pojazdów ciężarowych będzie ograniczona o 10% w stosunku do obecnych limitów, a dla autobusów o 40%. Limity emisji składników toksycznych w roku 2020 mają wynosić: 50% normy Euro IV z jednoczesną kontrolą emisji PM_{0,1} dla pojazdów LDV, a dla HDV wartości te mają wynosić: NO_x – 25% normy Euro IV, PM – 50% Euro IV.

W najbliższej przyszłości następować będzie zmniejszenie wymiarów głównych silników (głównie zmniejszenie pojemności skokowej) – *downsizing*; będzie się ono często łączyć z turbodoładowaniem lub doładowaniem mechanicznym, a także z przeprojektowaniem silnika. W porównaniu do dzisiejszych wartości możliwe jest zmniejszenie silników ZI o ponad 40%, co powinno łączyć się ze zmniejszeniem zużycia paliwa o około 20% i docelową mocą jednostkową 150 kW/dm³. Szerokie wprowadzenie bezpośredniego wtrysku benzyny będzie się jednak opóźniać do czasu opracowania tanich i skutecznych układów oczyszczania spalin pracujących przy mieszankach ubogich.

Downsizing dotyczy również silników ZS do pojazdów LDV i także będzie wymagać wzrostu stopnia doładowania silnika, a także z elektrycznym wspomaganie turbosprężarki. Razem z obniżonymi stratami tarcia w silniku przewiduje się obniżenie zużycia paliwa o 25% (rys. 9) i uzyskanie wysilenia na poziomie 70 kW/dm³. Dynamiczny rozwój układów wtryskowych, zapewniających niemal dowolne kształtowanie charakterystyki wtrysku, a także wprowadzenie wtryskiwaczy o zmiennym przekroju wypływu paliwa i wzrost ciśnienia wtrysku do 300 MPa zapewni tak niską emisję NO_x i PM z silników LDD, że nie będą potrzebne układy pozasilnikowego usuwania tych sub-

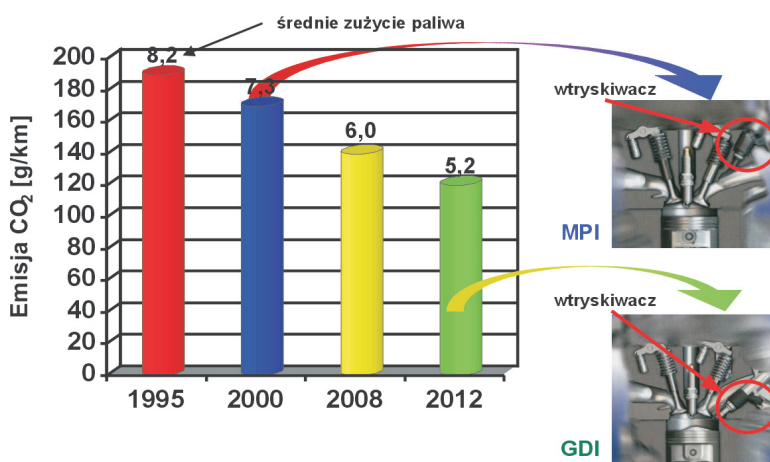


Rys. 9. Redukcja zużycia paliwa w wyniku zmniejszenia wymiarów silnika ZS DI

Fig. 9. Fuel economy increase due to downsizing in CI DI engines

necessity to burn richer mixtures than in the previous solution, a strong mixture swirl during compression, higher hydrocarbon emission, a complex multisensor injector control systems.

The advancement of the automotive industry worldwide must take environment protection into account. Greater emphasis is being put on the reduction of CO₂ emission; beginning from 2008 the collective emission limit for a vehicle fleet of a single manufacturer will amount to 140 g/km, from 2012 – 120 g/km (Fig. 8). The CO₂ reduction is to be made not only in the vehicle's tailpipe emissions but in the whole life cycle – *from well to wheel*. Supposedly an appropriate legislative policy will allow, within the next 20 years, a total reduction of emission from vehicles 3–5 times. Further emission standards will inevitably be a factor in this process as well as the integration of the regulations.



Rys. 8. Zmiany sposobu zasilania i ich wpływ na emisję CO₂

Fig. 8. Development of the fuel supply system and its impact on CO₂ emission

For LDV vehicle types in 2020 the CO₂ emission is to be limited to 95 g/km (a limit for a vehicle fleet of a single manufacturer), in 2030 to 80 g/km. It is forecasted that the emission of carbon dioxide for heavy duty vehicles will be limited by 10%, as opposed to current limits and for buses and coaches by 40%. The limits of toxic compounds in 2020 are to be: 50% of Euro IV standard along with PM_{0,1} control for LDV vehicles, for HDV the values are: NO_x – 25% of Euro IV standard, PM – 50% of Euro IV standard.

In the nearest future a process of downsizing is to take place; it will mostly be accompanied by turbocharging or supercharging including engine redesign. As compared to current engines sizes, it is feasible that the size reduction of SI engines can go as far as 40%, which should result in a decrease in fuel consumption by 20% and the specific power output increase up to 150 kW/dm³. A wide introduction of gasoline direct injection will, however, be delayed until cheap and efficient lean burn exhaust gas aftertreatment systems are developed.

Downsizing will also affect CI LDV engines and will require increase in engine boost and electric turbochargers. Along with the decrease in friction losses, fuel consumption will drop by 25% (Fig. 9) and the power output will rise to approximately 70 kW/dm³. Dynamic advancement of fuel injection systems that allows practically any fuel injection char-

stancji. Dalsze obniżenie zużycia paliwa wymagać będzie obniżenia strat w silniku – mechanicznych, chłodzenia i na napęd osprzętu. Redukcja zużycia paliwa i emisji toksycznych składników spalin będzie wymagała możliwie pełnej kontroli przebiegu procesu spalania, obejmującej pojedyncze obiegi.

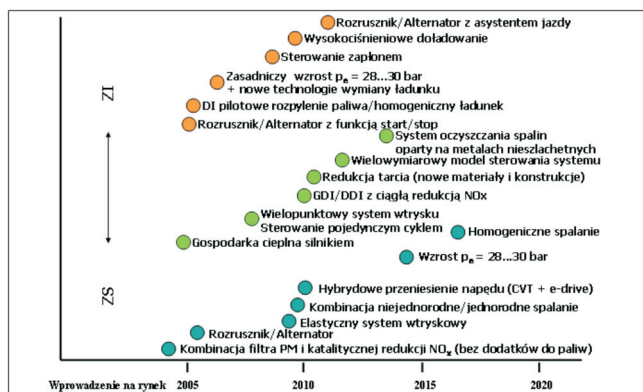
Od roku 1997, tj. od wprowadzenia pierwszych wersji akumulatorowego wtrysku paliwa, obserwowany jest ciągły rozwój i coraz szersze wprowadzanie na rynek nowoczesnych rozwiązań silników ZS (rys. 10, 11). Obecnie większość europejskich producentów posiada w swojej ofercie samochody z jednostkami napędowymi typu CR DDI (*Common Rail Diesel Direct Injection*). Wynika to z mniejszego zużycia paliwa w porównaniu z silnikami benzynowymi oraz z korzystnych parametrów uzyskiwanych przez te silniki. Przewiduje się, że w kolejnych latach tendencja będzie się utrzymywała i nastąpi dalszy wzrost sprzedaży samochodów napędzanych takimi jednostkami. Według przewidywań, w roku 2006 połowa nowo sprzedawanych samochodów w Europie będą to pojazdy wyposażone w silniki o zapłonie samoczynnym. Prognozy dalszego wzrostu udziału silników ZS na rynku samochodów osobowych są uzasadnione wobec ciągłego limitowania emisji CO₂.

Spełnienie przyszłych wymagań dotyczących emisji (w tym także CO₂) będzie podstawowym kryterium wyznaczającym kierunki rozwoju silników CR DDI stosowanych do napędu samochodów osobowych. Ważnym zagadnieniem jest również obniżanie kosztów wytwarzania i eksploatacji do takiego poziomu,

acteristics, the introduction of variable fuel injectors and the increase in injection pressure to 300 MPa will guarantee so low emission of NO_x and PM in LDD engines that other after-treatment systems will no longer be necessary. Further increase in fuel economy will require a reduction in energy losses – mechanical, cooling and aggregate drive related ones. The reduction of fuel consumption and level of toxic emissions will require full control of the combustion process in its all stages.

Since 1997, i.e. since the introduction of first electrically controlled fuel injection, a constant evolution of CI engines and respectively more technical solutions being launched into the market are observed (Fig. 10, 11). Currently, the majority of European car manufacturers have, in their offer, vehicles fitted with CR DDI (*Common Rail Diesel Direct Injection*). This is due to lower fuel consumption (as opposed to gasoline engines) and very favorable performance values. As it is forecasted, these trends will continue and further sales increase of these engines will ensue. As the forecasts have it, in 2006 half of the new vehicles in Europe will be fitted with CI engines. The prognoses relating to the increase in the market share of CI engines are well substantiated, judging from the continual limitation of CO₂ emission.

The fulfillment of the requirements regarding emissions (including CO₂) will be a vital criterion deciding about the future trends in the development of CR DDI engines for pas-



Rys. 10. Rozwój silników ZI i ZS do samochodów osobowych (typu PC) [6]

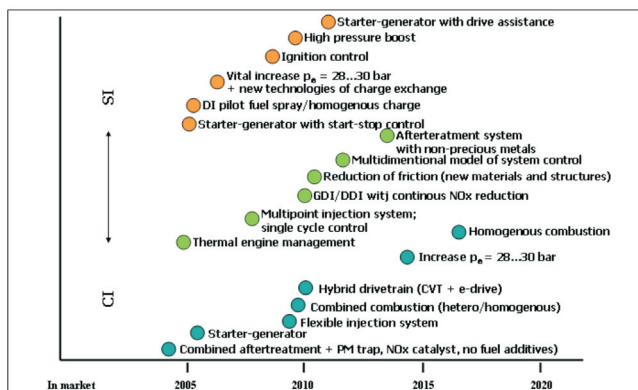
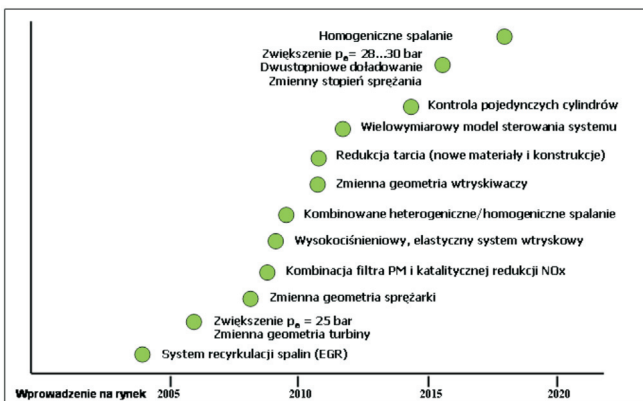


Fig. 10. Evolution of SI and CI engines in passenger cars (PC-type) [6]



Rys. 11. Rozwój silników ZS do pojazdów typu HDD [6]

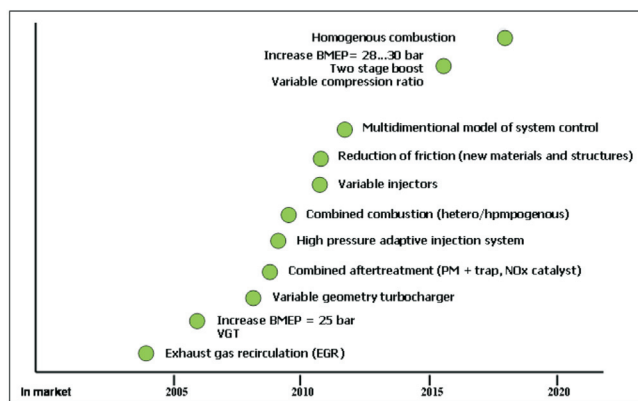


Fig. 11. Evolution of CI engines for HDD vehicles [6]

aby silniki te mogły konkurować z silnikami ZI, które stanowią dużą konkurencję w przedziale małych i średnich pojazdów. Spełnienie przedstawionych wymagań będzie możliwe do osiągnięcia dzięki dalszemu unowocześnianiu opisywanych systemów wtryskowych w połączeniu z modernizacją konstrukcji silnika. Obecnie prowadzone są badania nad opracowaniem systemu spalania homogenicznej mieszanki w silnikach o zapłonie samoczynnym z bezpośrednim wtryskiem paliwa.

Kolejne rozwiązanie umożliwiające spełnienie normy Euro IV, to zastosowanie głowic wielozaworowych i stosowanie kontrolowanego spalania. Również coraz częściej mówi się o wprowadzeniu systemu zmiennych faz rozrządu do silników o zapłonie samoczynnym (rys. 12).

Postęp technologiczny w dziedzinie silników ZS doprowadził do znacznego wzrostu zainteresowania tego rodzaju napędem. Najnowsze konstrukcje silników ZS różnią się bardzo od hałaśliwych jednostek produkowanych według tradycyjnych rozwiązań konstrukcyjnych. Szczególnie turbodoładowane silniki o wtrysku bezpośrednim (DI – *Direct Injection*), w tym silniki wykorzystujące bezpośredni wtrysk *Common Rail*, odznaczają się bardzo dużym średnim ciśnieniem użytym, zapewniającym wyjątkowo dobre osiągi przy zachowaniu małego jednostkowego zużycia paliwa.

Już kilkadziesiąt lat temu wygłaszano opinie, iż silnik spalinowy osiągnął szczyt swego rozwoju. W rzeczywistości dokładnie nie wiadomo, jaki potencjał tkwi jeszcze w silniku spalinowym. Osiągi i rozwiązania, które niedawno wydawały się niemożliwe, dziś występują już w silnikach seryjnych. Przykładem może być ciśnienie wtrysku w silnikach ZS, które w ciągu ostatnich kilku lat wzrosło prawie dziesięciokrotnie (rys. 13).

Turbodoładowanie jest szeroko stosowanym sposobem zmniejszenia zużycia paliwa i emisji substancji toksycznych przez silniki ZS (rys. 14), przy jednoczesnym zwiększeniu objętościowego wskaźnika mocy. Pełne wykorzystanie możliwości wynikających z doładowania wymaga zapewnienia odpowiedniej wydajności w całym zakresie prędkości obrotowych i obciążenia silnika. Spełnienie tego warunku umożliwiają turbosprężarki o zmiennej geometrii kierownicy VGT (*Variable Geometry Turbocharger*) lub zmiennym przepływie VFT (*Variable Flow Turbocharger*). Wzrasta dzięki temu szybkość reagowania silnika na wszelkie zmiany warunków pracy oraz

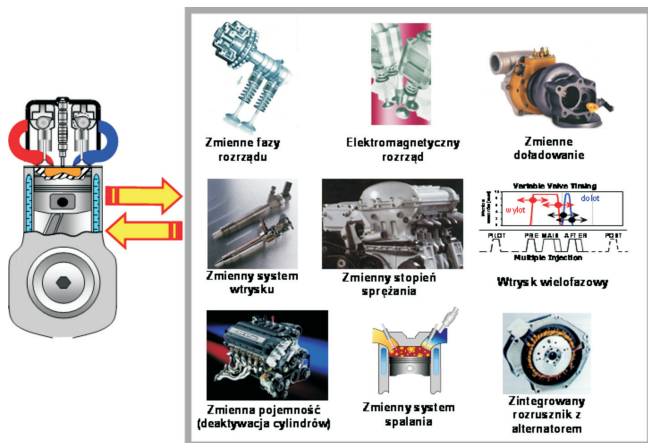
senger cars. Another important issue is the reduction of the costs of production and vehicle operation/maintenance to a level that will facilitate CI engines in the competition with SI engines, currently being highly competitive in the sector of passenger cars. The fulfillment of the said requirements will only be possible if further development of the described fuel injection systems proceeds together with engine remodelling. Currently, research is carried out on homogenous mixture burn in CI direct injection engines.

Yet another solution leading to Euro IV standard compliance is the application of multi-valve heads and controlled auto ignition. Engineers more frequently discuss the possibility of introduction of variable valve timing in CI engine (Fig. 12).

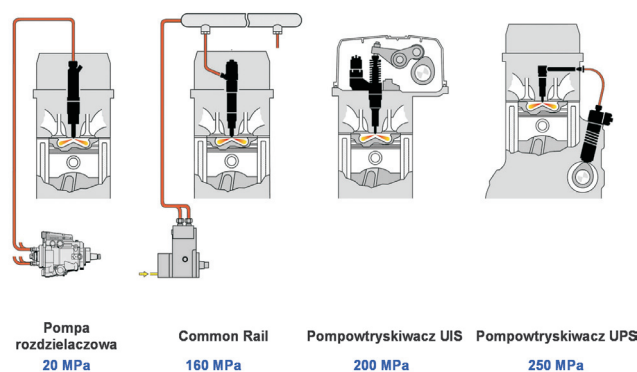
Technological advancement in CI engines has led to a growth in interest for this type of drive. The latest CI engines differ considerably from their noisy predecessors manufactured according to old technological solutions. Particularly turbocharged direct injection engines, including DI Common Rail types are distinguished by a high mean effective pressure guaranteeing excellent performance at a relatively low specific fuel consumption.

It has been a couple of decades since first opinions came that the combustion engine has reached its maximum level of development. Actually, it can never be ascertained what potential there is in a combustion engine, still to be exploited. The engine performance and solutions, not so long ago construed as impossible, are now implemented in serial production. Let us take the injection pressure in CI engines as an example, which has risen almost ten times for the last couple of years (Fig. 13).

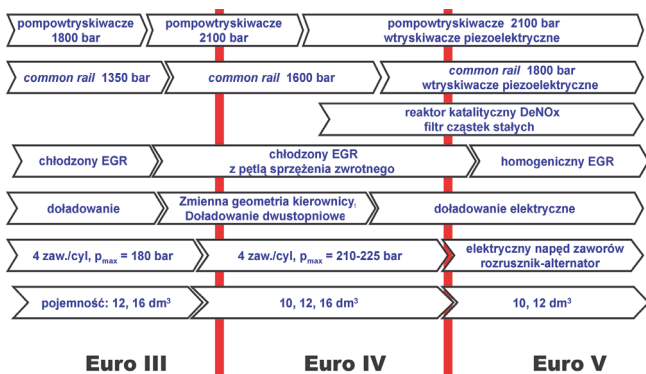
Turbocharging is a widely applied measure to minimize fuel consumption and level of toxic emissions in CI engines (Fig. 14). It also increases volumetric power output. Full exploitation of the possibilities arising from the application of a turbocharger requires appropriate efficiency in the whole range of engine revolutions and engine loads. Only variable geometry turbochargers or variable flow turbochargers allow that. Thanks to such turbochargers the engine promptness in reacting to the changing parameters and the torque in the whole range of engine revolutions increase. Besides, adjusting the turbocharger efficiency to a momentary air demand leads to a drop in NO_x emission and fuel consumption at high engine speeds and low engine loads.



parametrach – *variable engine*
 Fig. 12. The concept of a variable engine



Rys. 13. Rozwój układów wtryskowych silników ZS i towarzyszący mu wzrost ciśnienia wtrysku [5]
 Fig. 13. Fuel injection system development in CI engines and accompanying injection pressure increase [5]



Rys. 14. Tendencje zmian w konstrukcji silników ZS HD mierzących do spełnienia kolejnych norm emisji spalin

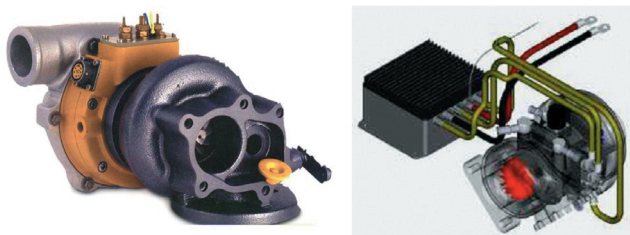
moment obrotowy w całym zakresie prędkości obrotowych. Oprócz tego dostosowanie wydajności sprężarki do chwilowego zapotrzebowania powietrza pozwala zmniejszyć emisję NO_x, a także zużycie paliwa w zakresie dużych prędkości obrotowych i małych obciążeń silnika.

Chłodzenie powietrza doładowanego zwiększa masę ładunku cylindra i powoduje obniżenie temperatury panującej w komorze spalania, co sprzyja redukcji emisji tlenków azotu. Obecnie testowane są turbosprężarki wspomagane elektryczne (rys. 15), które np. włączone podczas zimnego rozruchu silnika uzyskują temperatury powietrza doładującego powyżej 100°C po 1 s pracy (dla temperatury otoczenia -25°C po 10 cyklach pracy silnika).

Emisja tlenku węgla i węglowodorów przez współczesne silniki ZS osiąga wartości zbliżone do notowanych w silnikach ZI wyposażonych w trójfunkcyjny reaktor katalityczny, a jej dalsza redukcja nie stwarza większych problemów. Najwięcej trudności sprawia natomiast ograniczenie emisji tlenków azotu i cząstek stałych. Silniki ZS mogą być wyposażone w reaktory katalityczne spalin typu Oxicat (Oxidation Catalyst – reaktor katalityczny utleniający) i DeNOx oraz filtry cząstek stałych. Reaktor DeNOx ulega stopniowo zatruciu zawartą w paliwie siarką, natomiast filtr ulega zapełnieniu cząstkami. Aby zapewnić skuteczną pracę tych urządzeń, ich efektywność musi być stale monitorowana, by w razie jej zmniejszenia uruchomić procedurę regeneracji.

Coraz większą uwagę zwraca się na ograniczanie emisji podczas zimnego rozruchu oraz nagrzewania silnika ZS i dlatego wyposaża się go w układy skracające czas nagrzewania i podjęcia pracy przez układy oczyszczania spalin (rys. 16).

Duży wpływ na emisję cząstek stałych ma rodzaj stosowanego paliwa. W przypadku pojazdów z silnikami z bezpośrednim wtryskiem oleju napędowego oraz benzyny o niskiej zawartości siarki następuje znaczne zmniejszenie liczby cząstek i ich masy w emitowanych spalinach. Emitowane cząstki z po-



Rys. 15. Turbosprężarka wspomagana elektrycznie
Fig. 15. An Turbocharger with electrical assistance

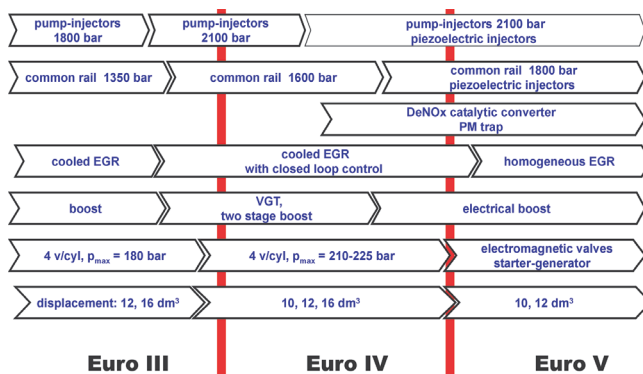


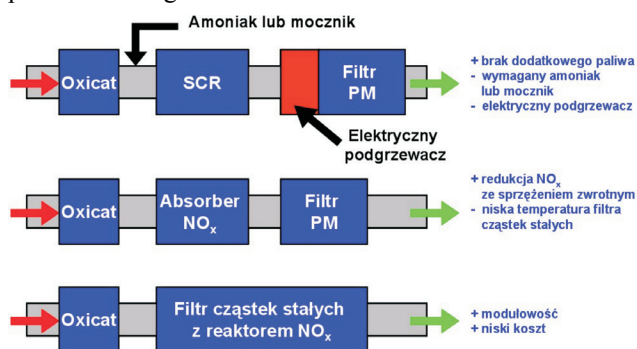
Fig. 14. Trends in the development in HD Diesel engines aiming at fulfilling another set of emission norms

Intercooling increases the mass of the cylinder charge and results in a lower temperature in the combustion chamber, which lowers the NO_x emission. Currently, electric variable turbochargers are being tested (Fig. 15) that, when actuated at a cold start, can generate temperatures of the charged air around 100°C after 1 s of operation (at ambient temperature -25°C after ten engine cycles).

Carbon monoxide and hydrocarbon emissions generated by modern CI engines nearly equal those of SI engines that are fitted with three-way catalytic converters and further reduction of those emissions is due. The biggest issue, however, is the reduction of NO_x and particulate matter. CI engines can be fitted with Oxicat catalytic converters (Oxidation Catalyst), DeNOx catalysts and particulate traps. DeNOx will gradually get „contaminated” by the sulphur contained in the fuel and the particulate trap will eventually get filled by particulates. In order to ensure proper operation of these components, their effectiveness must be monitored on a continuous basis, so as to enable the regeneration procedure, if necessary.

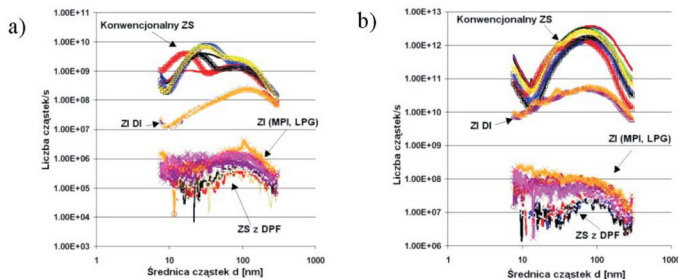
More attention has recently been drawn to emission reduction at cold start and warm up cycles in CI engines. That is why the systems are equipped with catalyst conditioning devices (Fig. 16).

Particulate matter emission is largely influenced by the type of fuel applied. In the case of diesel engines with direct fuel injection and gasoline engines with low sulphur fuels a drop in number of particles and their mass is observed. The particle mass and content generated by direct gasoline injection engines are similar to those generated by diesel engines fitted with diesel particulate filter. Particulate matter emissions for selected engine technologies in different conditions are presented in Fig. 17.



Rys. 16. Koncepcje pozasilnikowych metod oczyszczania spalin
Fig. 16. Aftertreatment concepts

jazdu wyposażonego we wtrysk bezpośredni benzyny są na podobnym poziomie ze względu na masę i skład, jak pochodzące z pojazdu z silnikiem ZS wyposażonym w filtr cząstek stałych (DPF – Diesel Particulate Filter). Emisję cząstek stałych dla wybranych technologii silników w różnych warunkach pracy przedstawiono na rysunku 17.



Rys. 17. Liczba cząstek i ich rozmiar podczas pracy silników pojazdów osobowych: a) na biegu jałowym, b) przy prędkości 50 km/h [1]

Fig. 17. Number of particles and size during engine operation in passenger cars: a) idle, b) at 50 km/h [1]

3. Perspektywy rozwoju silników spalinowych

Znacznie mniejsze zużycie paliwa, a w konsekwencji mniejsza emisja CO₂ oferowana przez silniki o bezpośrednim wtrysku paliwa, doprowadzi przypuszczalnie do stopniowej eliminacji silników o innych układach zasilania, przy czym w dziedzinie silników ZI będzie to zapewne proces długofalowy.

Konwencjonalne silniki spalinowe jeszcze długo pozostaną podstawowym źródłem napędu pojazdów. Ze względu na wymagania ekologiczne (kolejne normy ograniczające emisję składników szkodliwych), producenci zmuszeni są do poszukiwania różnych form zmniejszenia szkodliwego oddziaływania silników na środowisko. Po wprowadzeniu na przełomie lat siedemdziesiątych i osiemdziesiątych zasilania wtryskowego i trójfunkcyjnego reaktora katalitycznego rozwój silników o zapłonie iskrowym osiągnął pewną stagnację, która trwała mniej więcej do połowy lat dziewięćdziesiątych. W tym czasie silniki ZS zbliżyły się do silników ZI pod względem osiągnięć, cały czas oferując znacznie mniejsze zużycie paliwa. Spowodowało to, że silniki ZI przestały być konkurencyjne wobec ZS i zaczęły tracić rynek, nawet tam, gdzie ich pozycja nie była wcześniej zagrożona (samochody osobowe). Prognozy długoterminowe wskazują jednak, że sprzedaż silników ZS będzie się zwiększała kosztem silników ZI (rys. 18).

Obecnie w pojazdach coraz częściej stosuje się (rys. 19–21):

- zintegrowane sterowanie elektroniczne,
- turbosprężarki wspomagane elektrycznie (EVTG),
- układy zmiany faz rozrządu i wzniosu zaworów,
- wtryskiwacze o zmiennym przekroju przepływu i geometrii strugi na obciążeniach częściowych.

Postęp technologiczny, jaki dokonuje się w tej dziedzinie musi uwzględniać uzyskanie odpowiedniego poziomu osiągnięć pojazdu, jego niezawodności, bezpieczeństwa oraz atrakcyjności handlowej.

Początek trzeciego tysiąclecia to okres wyjątkowo intensywnego rozwoju silników spalinowych, a także największej jak dotąd ich produkcji. Prognoza nakreślona przez FUTURE (Future Road Vehicle Research – organizacja analizująca przyszłość transportu drogowego działająca pod auspicjami Ko-

3. Some trends in the development of combustion engines

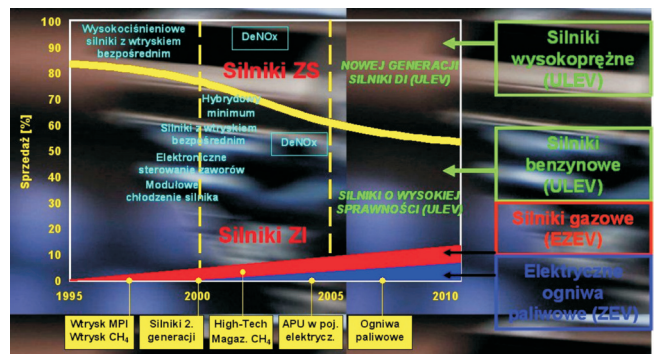
A sizeable fuel economy increase and, consequently, lower CO₂ emission in direct injection engines, will likely lead to a gradual elimination of engines of any other fuel systems. In the case of CI engines, however, this will be a long term process.

Conventional combustion engines will, for a long time to come, remain the most commonplace source of vehicle drive. Due to ecological requirements (further emission standards), the manufacturers are forced to seek a variety of methods to reduce harmful impact of combustion engines on the environment. After the introduction of fuel injection systems and three-way catalytic converters at the end of 1970's the development of gasoline engines, somewhat, came to a deadlock which lasted until mid 90's. In this time the CI engines converged technologically with SI engines in terms of performance, still offering a much lower fuel consumption. It led to a situation where SI engines were no longer competitive as compared to CI engines, which started to gain their market share, even in the sector where their position was not at all jeopardized (passenger cars). Long term forecasts indicate that the sales of CI engines are to grow at the cost of SI engines (Fig. 18).

At present, vehicles are often equipped with (Fig. 19–21):

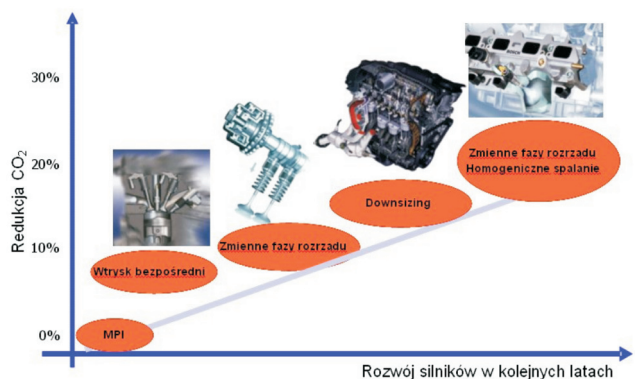
- integrated electronic control,
- electric variable turbochargers,
- variable valve timing and valve lift control,
- variable injectors at partial loads.

Technological advancement, which is currently in progress, must take into account level of performance, reliability, safety and affordability.



Rys. 18. Prognozowana sprzedaż silników z różnymi typami układów zasilania

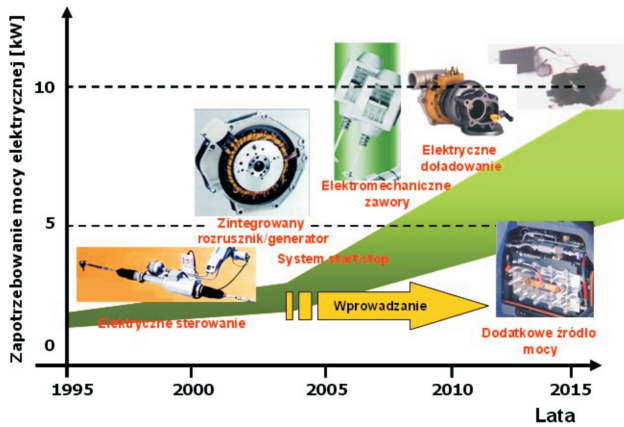
Fig. 18. Forecasted sales of various types of fuel systems



Rys. 19. Rozwój konstrukcji silników a redukcja emisji CO₂

Fig. 19. Development of engine design versus emission of CO₂

misji Europejskiej), przewiduje na najbliższe 30 lat szeroki rozwój tłokowych silników spalinowych (rys. 22).



Rys. 20. Rozwój systemów elektrycznych silnika spalinowego
Fig. 20. Development of electric systems in combustion engines



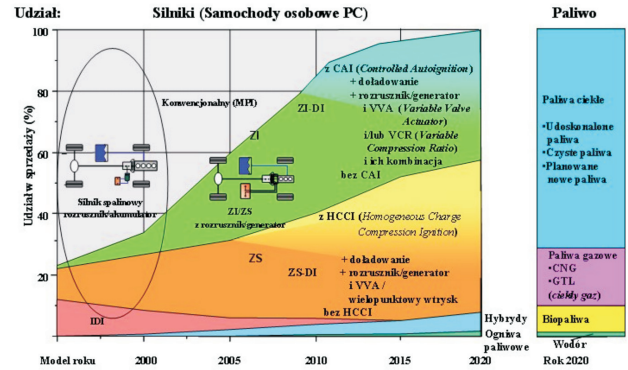
Rys. 22. Najważniejsze kierunki rozwoju samochodowych silników ZI i ZS według FURORE [3]

4. Zakończenie

Spełnienie przyszłych wymagań dotyczących zmniejszenia emisji (w tym także CO₂) będzie podstawowym kryterium wyznaczającym kierunki rozwoju silników stosowanych do napędu pojazdów (rys. 23). Prognozy przedstawiane przez organizację EARPA (European Automotive Research Partners Association – Europejski Związek Ośrodków Badawczych Pojazdów) przewidują, że po wprowadzeniu norm Euro V, kolejnym etapem będzie już tylko obniżanie limitów zużycia paliwa.

Ważnym zagadnieniem jest również obniżanie kosztów wytwarzania i eksploatacji do takiego poziomu, aby silniki ZS mogły konkurować z silnikami ZI, które w przedziale małych i średnich pojazdów stanowią dużą konkurencję. Pojawiają się także pierwsze rozwiązania, w których dochodzi do zbliżenia przebiegu procesu spalania charakterystycznego dla obu typów silników. Dotyczy to szczególnie silników ZS, w przypadku których dąży się do spalania homogenicznego, zbliżonego do występującego w silnikach ZI (rys. 24), gdyż powstawanie cząstek stałych i tlenków azotu (a więc najtrudniejszych do usunięcia skład-

The beginning of the third millennium is a period of extraordinarily rapid and intense development of combustion engines and their largest production ever. FURORE (Future Road Vehicle Research – an organization analyzing the future of road transportation operating under the auspices of European Commission), forecasts, for the next 30 years, a wide evolution of piston engines (Fig. 22).



Rys. 21. Scenariusz rozwoju pojazdów w Europie [6]
Fig. 21. Vehicle evolution scenario for Europe [6]

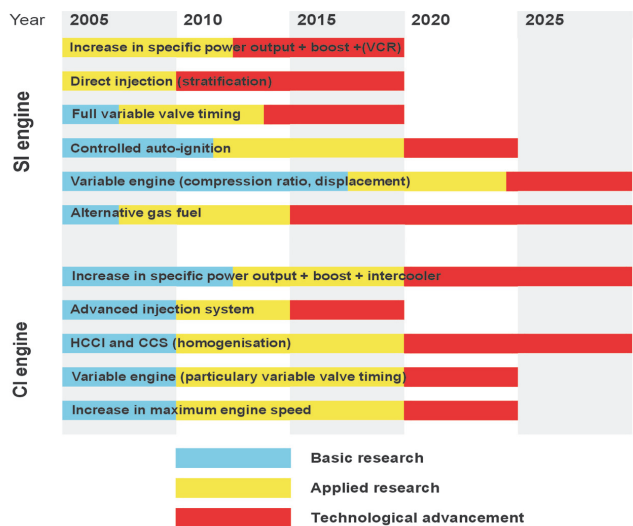
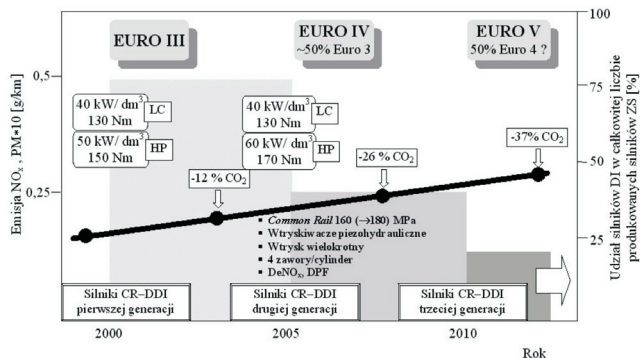


Fig. 22. The most essential trends in the development of CI and SI vehicle engines according to FURORE [3]

4. Conclusion

The fulfillment of future emission requirements (including CO₂) will be the basic criterion for the development of vehicle engines (Fig. 23). The forecasts presented by EARPA (European Automotive Research Partners Association) show that having introduced the Euro V standard, the only remaining issue will be the increase in fuel economy.

The cost reduction process in terms of production and subsequent maintenance is not devoid of importance. Namely, the costs should be reduced to a level that will allow CI engines to compete with SI engines, which in the sector of light duty vehicle constitute a rival. First solutions have also appeared that aimed at converging the combustion processes of both CI and SI engines. This applies particularly to compression ignition, in the case of which, efforts are made to



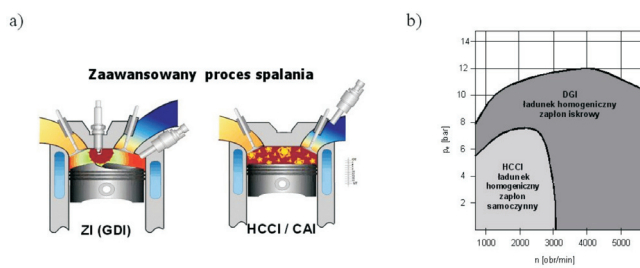
Rys. 23. Prognozy rozwoju silników ZS [3, 4]
 Fig. 23. CI engine development forecasts [3, 4]

ników spalin) w silniku ZS w znacznym stopniu wynika z heterogenicznego charakteru procesu spalania [4].

Spełnienie przedstawionych wymagań będzie możliwe dzięki dalszemu unowocześnianiu systemów wtryskowych w połączeniu z modernizacją konstrukcji silnika. Obecne kierunki zmian konstrukcyjnych przedstawiono w tablicy 1.

Tab. 1. Kierunki rozwoju silników pojazdów samochodowych

Silnik	I etap	II etap
ZI	Downsizing do 40% (obniżenie emisji CO ₂ o 20%) Boosting (doładowanie mechaniczne, turbo i VGT) Wtrysk bezpośredni (DI) $\lambda = 1$ i $\lambda > 1$ Zmienne fazy rozrządu i wznios zaworów (obniżenie CO ₂ o 10%) Zmienny stopień sprężania $\epsilon = 8-14$ (zmniejszenie emisji CO ₂ o 25%) Instalacja 42 V (odzyskiwanie energii hamowania, alternator/rozrusznik, semihybryda)	Adaptacyjne sterowanie Elastyczne podsystemy silnika Nowe systemy spalania Wzrost efektywności pracy silnika Przystosowanie do spalania gazu ziemnego i wodoru Wysokodoładowane silniki spalające ubogie mieszanki Zarządzanie przez jeden sterownik całym układem napędowym Sterowanie x-by-wire
	Zmniejszenie objętości skokowej, przy zwiększeniu wskaźnika mocy jednostkowej do 75 kW/dm ³ Duży stopień doładowania Turbosprężarka wspomagana elektrycznie, EVGT Chłodzony układ recykulacji spalin EGR Zmienne fazy rozrządu Zaawansowane systemy wtrysku (podzielność dawki paliwa; dawka pilotująca, główna, powtrysk - zmniejszenie NO _x i PM) Wtryskiwacze o zmiennej średnicy otworków rozpylacza Zaawansowane systemy oczyszczania spalin	Adaptacyjne podsystemy silnika sterowane w całym zakresie pracy Downsizing Wzrost doładowania (lepsze wytrzymałościowo materiały) Strategia sterowania pojedynczych cykli pracy Zastosowanie ładunku homogenicznego na mocach częściowych Nowe systemy spalania ze sterowaniem zapłonu (zmniejszenie NO _x i PM)
ZS	Zmniejszenie objętości skokowej Duży stopień doładowania Turbosprężarka wspomagana elektrycznie Chłodzony układ recykulacji spalin Zmienne fazy rozrządu i wznios zaworów Filtr cząstek stałych, selektywna redukcja katalityczna z wykorzystaniem mocznika Zaawansowane systemy wtrysku Wtryskiwacze o zmiennej średnicy otworków Obniżenie zużycia paliwa Poprawa procesu spalania Adaptacyjnie regulowane maksymalne ciśnienie wtrysku Nacisk na obniżenie kosztów eksploatacji	Adaptacyjne podsystemy silnika sterowane w całym zakresie pracy Downsizing Wzrost doładowania (lepsze wytrzymałościowo materiały) Strategia sterowania pojedynczych cykli pracy Zastosowanie ładunku homogenicznego na mocach częściowych Nowe systemy spalania ze sterowaniem zapłonu (zmniejszenie NO _x i PM)
	Zmniejszenie objętości skokowej Duży stopień doładowania Turbosprężarka wspomagana elektrycznie Chłodzony układ recykulacji spalin Zmienne fazy rozrządu i wznios zaworów Filtr cząstek stałych, selektywna redukcja katalityczna z wykorzystaniem mocznika Zaawansowane systemy wtrysku Wtryskiwacze o zmiennej średnicy otworków Obniżenie zużycia paliwa Poprawa procesu spalania Adaptacyjnie regulowane maksymalne ciśnienie wtrysku Nacisk na obniżenie kosztów eksploatacji	Adaptacyjne podsystemy silnika sterowane w całym zakresie pracy Downsizing Wzrost doładowania (lepsze wytrzymałościowo materiały) Strategia sterowania pojedynczych cykli pracy Zastosowanie ładunku homogenicznego na mocach częściowych Nowe systemy spalania ze sterowaniem zapłonu (zmniejszenie NO _x i PM)



Rys. 24. Hybryda zapłonu iskrowego i samoczynnego (a) oraz pole pracy silnika AVL CSI (b)

Fig. 24. A hybrid of spark ignition and compression ignition (a), and work area of AVL CSI engine (b)

obtain homogenous combustion, as is in the case of SI engines (Fig. 24). It is because the formation of particulate matter and NO_x (the hardest to eradicate) is largely due to the heterogenous character of the combustion process [4].

The fulfillment of the said requirements will be possible thanks to further development of fuel injection systems along with the redesign of the engines. Current trends in the structural development are presented in table 1.

Tab. 1. Trends in the development of vehicle engines

Engine	Stage I	Stage II
SI	Downsizing up to 40% (CO ₂ drop by 20%) Boosting (supercharging, turbo charging and VGT) Direct injection (DI) - $\lambda = 1$ and $\lambda > 1$ Variable valve timing and lift control (CO ₂ drop by 10%) Variable compression ratio $\epsilon = 8-14$ (CO ₂ drop by 25%) 42 V electric system (braking energy recuperation, starter-alternator, semi-hybrid)	Adaptive control Flexible engines subsystems New combustion systems Increase in engine effectiveness (including full load) Operation on CNG and hydrogen Charged lean burn engines A single controller management of the whole drivetrain X-by-wire control
CI	LDD DI Reduction of engine displacement along with increase in specific power up to 75 kW/dm ³ High boost level EVGT EGR - intercooled Variable valve timing Advanced fuel injection systems (injection phases: pilot injection, main injection, post injection - NO _x and PM reduction) Variable injectors Advanced aftertreatment systems	Adaptive engine control in the whole range of operation Downsizing More boost (better materials in terms of strength/durability) Strategy of control of single work cycles Homogenous charge application at partial loads New combustion systems with automatic ignition control (NO _x and PM reduction)
	HDD DI Reduction of engine displacement High boost level EVGT EGR- intercooled Variable valve timing Particulate trap, selective catalytic reduction (urea application) Advanced fuel injection systems Variable injectors Increase in fuel economy Improvement of combustion process Adaptive maximum fuel injection pressure Emphasis on maintenance cost reduction	Adaptive engine control in the whole range of operation Downsizing More boost (better materials in terms of strength/durability) Strategy of control of single work cycles Homogenous charge application at partial loads New combustion systems with automatic ignition control (NO _x and PM reduction)

Literatura/Bibliography

- [1] Anderson J., Wedekind B.: Particulate Research Programme 1998–2001, Summary Report, DETR/SMMT/CONCAVE, no. 5, 2001.
- [2] AVL Regulations & Standards, Current and Future Exhaust Emission Legislation AVL, Graz 05.2003.
- [3] FUIRORE – Future Road Vehicle Research: R&D Technology Roadmap. 10.2003.
- [4] Fürhapter A., Piock W., Fraidl G.: Homogene Selbstzündung. Die praktische Umsetzung am transienten Vollmotor. Motortechnische Zeitschrift, No. 2/2004.
- [5] Imarisio R., Rossi S.: Potential of Future Common Rail DI Diesel Engine. Ingenierus de l'Automobile, no. 10, 2001.
- [6] Materiały firmy Bosch.
- [7] Rault A.: Midl and Long Term Powertrains Evolution, Associated Fuels, Eucar, European Council for Automotive R&D, 20.02.2002.
- [8] Watanabe H.: Hybrid Vehicles – the Mainstream Eco-Vehicle of Tomorrow. F2000PA02, Fisita World Automotive Congress, Seoul 2000.

Skróty i oznaczenia/Nomenclature

- APU *Auxiliary Power Unit* – dodatkowe źródło zasilania
- CAI *Controlled Auto-Ignition* – sterowany samozapłon paliwa
- CCS *Combined Combustion System* – system spalania ładunku homogenicznego silniku ZS, rozwinięcie systemu HCCI z wtryskiem paliwa bezpośrednio do cylindra
- CNG *Compressed Natural Gas* – sprężony gaz ziemny
- CNG-HV *Compressed Natural Gas-Hybrid Vehicle* – pojazd o napędzie hybrydowym z silnikiem zasilanym CNG
- CR DDI *Common-Rail Diesel Direct Injection* – akumulacyjny wtrysk paliwa
- CSI *Compression-Spark Ignition* – połączenie zapłonu iskrowego i samoczynnego
- DeNO_x *Decrease NO_x* – reaktor katalityczny obniżający NO_x
- D-HV *Diesel-Hybrid Vehicle* – pojazd o napędzie hybrydowym z silnikiem ZS
- DPF *Diesel Particulate Filter* – filtr cząstek stałych
- EARPA *European Automotive Research Partners Association* – Europejski Związek Ośrodków Badawczych Pojazdów
- EGR *Exhaust Gas Recirculation* – układ recyrkulacji spalin
- EUDC *Extra Urban Drive Cycle* – pozamijski europejski test jezdny
- EV *Electric Vehicle* – pojazd elektryczny
- EVGT *Electric Variable Geometry Turbocharger* – turbina o zmiennej geometrii łopatek kierownicy wspomagana elektrycznie
- FUIRORE *Future Road Vehicle Research* – działająca pod auspicjami Komisji Europejskiej organizacja analizująca przyszłość transportu drogowego
- GDI *Gasoline Direct Injection* – system wtrysku bezpośredniego silników ZI
- G-HV *Gasoline-Hybrid Vehicle* – pojazd o napędzie hybrydowym z silnikiem ZI
- H₂FC *Hydrogen Fuel Cell* – pojazdy napędzane ogniwami paliwowymi (wodorowymi)
- HC *High Cost Equipment* – systemy o wysokim koszcie całkowitym (zaawansowana technologia)
- HCCI *Homogenous Charge Compression Ignition* – system spalania ładunku homogenicznego w silniku ZS
- HDD *Heavy Duty* – ciężki silnik ZS
- HV *Hybrid Vehicle* – pojazd o napędzie hybrydowym
- IDI *Indirect Injection* – wtrysk pośredni (silniki ZS)
- ISAD *Integriertes-Starter-Alternator-Dämpfersystem* – zintegrowany rozrusznik z alternatorem
- i-VTEC *intelligent-Variable Valve Timing and Lift Electronic Control* – system inteligentnej zmiany faz rozrządu i elektronicznej kontroli wzniosu zaworów firmy Honda
- LC *Low Cost equipment* – systemy o niskim koszcie całkowitym (standardowa technologia)
- LDD *Light Duty Diesel* – lekki pojazd ciężarowy z silnikiem ZS
- MPI *Multi Point Injection* – wielopunktowy niskociśnieniowy wtrysk paliwa do kanałów dolotowych (dotyczy silników ZI)
- NEDC *New European Driving Cycle* – nowy europejski cykl jezdny – zmodyfikowany ECE R83 (tzw. Eurotest) z natychmiastowym poborem spalin
- Oxicat *Oxidation Catalyst* – reaktor katalityczny utleniający
- PM_{0,1} cząstki stałe o średnicy mniejszej lub równej 0,1 mm
- SCR *Selective Catalytic Reduction* – selektywna redukcja katalityczna
- SPI *Single Point Injection* – jednopunktowy niskociśnieniowy wtrysk paliwa do kolektora dolotowego
- TDI *Turbo Diesel Injection* – turbodoładowany silnik ZS z bezpośrednim wtryskiem paliwa
- UDC *Urban Driving Cycle* – miejski europejski cykl jezdny
- ULEV *Ultra Low Emission Vehicle* – pojazd o bardzo niskiej emisji
- VCR *Variable Compression Ratio* – zmienny stopień sprężania
- VFT *Variable Flow Turbocharger* – turbosprężarka o zmiennym przepływie
- VGT *Variable Geometry Turbocharger* – turbina o zmiennej geometrii łopatek kierownicy
- VVT-i *Variable Valve Timing-intelligent* – system inteligentnej zmiany faz rozrządu firmy Toyota
- VVTL-i *Variable Valve Timing and Lift-intelligent* – system inteligentnej zmiany faz rozrządu i elektronicznej kontroli wzniosu zaworów firmy Toyota
- XFC-HV *Fuel Cell-Hybrid Vehicle* – pojazd hybrydowy napędzany ogniwami paliwowymi (o nieokreślonym zasilaniu ogniw)
- XX-HV *Hybrid Vehicle* – pojazd hybrydowy (o nieokreślonym napędzie)
- ZEV *Zero Emission Vehicle* – pojazd o zerowej emisji
- λ *air fuel equivalent ratio* – współczynnik nadmiaru powietrza

Artykuł recenzowany

* Prof. dr hab. inż. Jerzy Merksiz – Profesor na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.
 Prof. Jerzy Merksiz D.Sc., Ph.D., M.E. – Professor in the Faculty Working Machines and Transport at Poznan University of Technology.

