

## Nowe standardy emisji w silnikach z zapłonem samoczynnym – silnik VW 2.0 TDI

### 1. Wstęp

W połowie lat 70. XX wieku dzięki firmie Volkswagen silnik o zapłonie samoczynnym stał się popularnym źródłem napędu samochodów osobowych. Kilka lat później (1978 r.) silnik tego rodzaju wprowadziła także firma Daimler-Benz w samochodzie Mercedes 300 SD.

Silnik Volkswagena z 1975 r. był pierwszą tego typu jednostką napędową produkowaną na masową skalę, przeznaczoną do popularnego samochodu klasy kompaktowej, jakim był Golf I generacji. Silnik ten o objętości skokowej 1,5 dm<sup>3</sup> był wyposażony we wtrysk pośredni z wirową komorą spalania i rozwijał moc 37 kW. Spotkał się on z bardzo dobrym przyjęciem na rynku przede wszystkim ze względu na dobre osiągi, przy znacznie mniejszym zużyciu paliwa w porównaniu ze stosowanymi wówczas jednostkami zasilanymi benzyną.

W następnych latach powstawały nowe konstrukcje z tego typu systemem spalania o objętości skokowej 1,6 oraz 1,9 dm<sup>3</sup>. W silniku 1,9 TD z 1995 r. o mocy 55 kW ze znacznym wyprzedzeniem spełniono standardy emisji toksycznych składników spalin, dostosowując go do wymagań normy Euro 2. Podobnie postępowano w latach następnych, oferując dużo wcześniej jednostki napędowe spełniające przyszłe limity emisji; w 1997 r. zaprezentowano silnik 1,9 TDI z bezpośrednim wtryskiem paliwa spełniający limity emisji Euro 3, a w 1999 r. 3-cylindrowy silnik 1,2 TDI, który w innowacyjnym modelu Lupo 3L już wtedy spełniał limity Euro 4. W roku 2002 zaprezentowano silnik 2,0 TDI PD (niem. *Pumpedüse*) zasilany pompowtryskiwaczami, który od tej pory stał się najbardziej poszukiwaną jednostką napędową stosowaną w pojazdach wszystkich marek należących do koncernu Volkswagen (Audi, Seat, Skoda), a także był montowany w pojazdach innych marek (Mitsubishi, Chrysler, Jeep). Rok później wprowadzono do produkcji odmianę tego silnika wyposażoną w filtr cząstek stałych, dzięki czemu już w 2003 r. spełniał on wymagania przyszłej normy Euro 4. W roku 2007 wprowadzono do produkcji silnik 2,0 TDI CR z układem zasilania *common rail*, który w zakresie emisji spełniał standardy normy Euro 5, na dwa lata przed obowiązkiem ich stosowania. W tej wersji silnik ten stanowił bazę konstrukcyjną dla jednostki napędowej przeznaczonej na rynek amerykański, która musiała spełnić limity emisji BIN5/LEV II, uważane obecnie za najbardziej rygorystyczne na świecie. Od końca 2008 r. tak przygotowany silnik jest oferowany w modelach Jetta i Passat sprzedawanych na rynku amerykańskim, a wkrótce znajdzie się także w innych sprzedawanych tam pojazdach koncernu. Kontynuując prace nad tym silnikiem, w 2009 r. opracowano jego wersję, która z powodzeniem spełnia limity emisji ustalone dla normy Euro 6, przewidzianej do wprowadzenia w krajach Unii Europejskiej w 2014 r.

### 2. Podstawowe cechy konstrukcyjne standardowej wersji silnika 2.0 TDI

Standardowy silnik 2.0 TDI spełniający wymogi normy Euro 5 powstał w 2007 r. i jest obecnie stopniowo wprowadzany do różnych modeli koncernu Volkswagen. Podstawowe cechy konstrukcyjne nowego silnika zostały przejęte ze sprawdzonej, produkowanej nadal jednostki 2.0 TDI PD zasilanej pompowtryskiwaczami, której produkcję rozpoczęto w 2002 r. Najistotniejsze różnice konstrukcyjne były związane z wprowadzeniem systemu zasilania *common rail*, natomiast główne parametry robocze silnika nie uległy zmianie (tab. 1).

Tabela 1. Podstawowe parametry silników VW 2,0 TDI

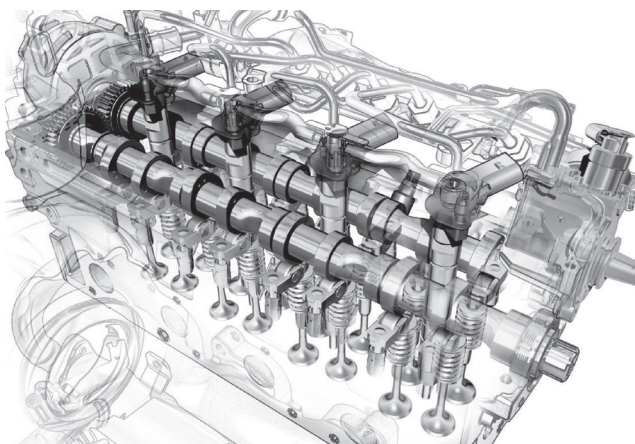
Typ silnika	2.0 TDI PD (2008)	2.0 TDI CR (2008)
Objętość skokowa [cm <sup>3</sup> ]	1968	1968
Układ zasilania	pompowtryskiwacze	<i>common rail</i>
Maksymalne ciśnienie wtrysku [MPa]	2050	1800
Średnica cylindra/ skok tłoka [mm]	81/95,5	81/95,5
Stopień sprężania [-]	18,5	16,5
Moc efektywna/pr. obr. [kW/ 1/min]	103/4000	103/4200
Maks. moment obr./ prędkość obr. [N·m/obr/min]	320/1900	320/1750–2250
Masa silnika [kg]	184	172
Spełniana norma emisji	Euro 4	Euro 5

Zastosowanie nowego układu zasilania pozwoliło na zmniejszenie zarówno masy, jak i wysokości silnika. Podczas gdy silnik zasilany pompowtryskiwaczami budowany był w wersji z dwoma lub czterema zaworami sterującymi wymianną ładunku, to nowa jednostka wyposażona jest wyłącznie w głowicę 16-zaworową (rys. 1).

Zastąpienie pompowtryskiwaczy elektronicznie sterowanymi wtryskiwaczami piezokwarcowymi umożliwiło otrzymanie zwartej konstrukcji głowicy. Przy utrzymaniu tego samego rozstawu cylindrów wynoszącego 88 mm w zmodernizowanym silniku głowica ma wysokość zaledwie 125 mm, a osie wałków rozrządu są oddalone od siebie tylko o 54,6 mm. Zawory umieszczone zostały pionowo, a ich uruchamianie następuje przez dźwigienki wyposażone w rolki, dzięki czemu uzyskano zmniejszenie strat mechanicznych.

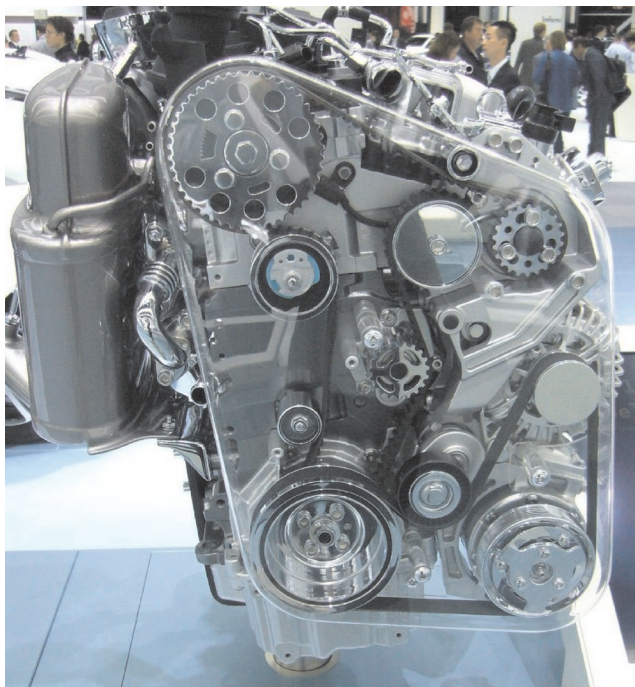
Kompaktowe wymiary głowicy, bardzo cienkie ścianki kanałów chłodzących oraz duża liczba elementów wchodzących w skład kompletnej głowicy, narzucają wiele wymagań związanych z zapewnieniem jej odpowiedniej trwałości. Chcąc uniknąć problemów występujących niekiedy w gło-

wicach silników poprzedniej generacji, podjęcie produkcji seryjnej poprzedzono badaniami symulacyjnymi oraz doświadczalnymi, prowadzonymi wspólnie z czterema różnymi zakładami, w których głowice są odlewane, oraz z czterema różnymi zakładami, w których głowice podlegają obróbce mechanicznej. W tych badaniach uwzględniono problemy histerezy odkształceń termicznych, a także przeprowadzono badania trwałościowe przy założonym ciśnieniu spalania wynoszącym 18 MPa.



Rys. 1. Głowica silnika Volkswagen 2.0 TDI CR [1]

Napęd układu rozrządu realizowany jest paskiem zębatym napędzającym wałek rozrządu zaworów wylotowych. Ten z kolei połączony jest z wałkiem zaworów dolotowych za pomocą przekładni zębatej o zębach prostych wyposażonej w układ kasowania luzów, co gwarantuje cichą pracę przekładni. W tym przypadku zastosowano dzielone na dwie części koło zębate wałka zaworów wylotowych. Oba wałki w celu zmniejszenia masy są puste w środku i są łożyskowane

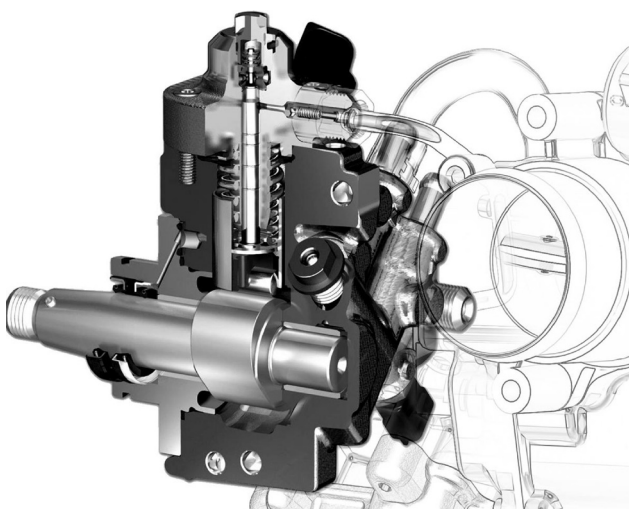


Rys. 2. Silnik Volkswagen 2.0 TDI CR od strony napędu rozrządu [5]

bezpośrednio w materiale głowicy i ramy wzmacniającej. Wałek zaworów dolotowych służy także do napędu nowego typu pompy podciśnienia, której konstrukcja pozwoliła na zmniejszenie strat mechanicznych.

W zmodernizowanym silniku zastosowano nowy system odpowietrzenia skrzyni korbowej z trzystopniowym systemem zatrzymywania oleju. Przyczynia się to nie tylko do zmniejszenia zużycia oleju, ale przede wszystkim do zmniejszenia emisji cząstek stałych powstających ze spalania oleju dostającego się do układu dolotowego.

Najważniejszym nowym systemem silnika jest układ zasilania *common rail* typu Bosch CRS 3.2. Zawiera on pompę wysokiego ciśnienia typu CP 4.1, która w przeciwieństwie do zwykle stosowanych pomp wielotłoczkowych ma tylko jedną sekcję tłoczącą, dzięki czemu zmniejszono straty tarcia o ok. 20% (rys. 3).



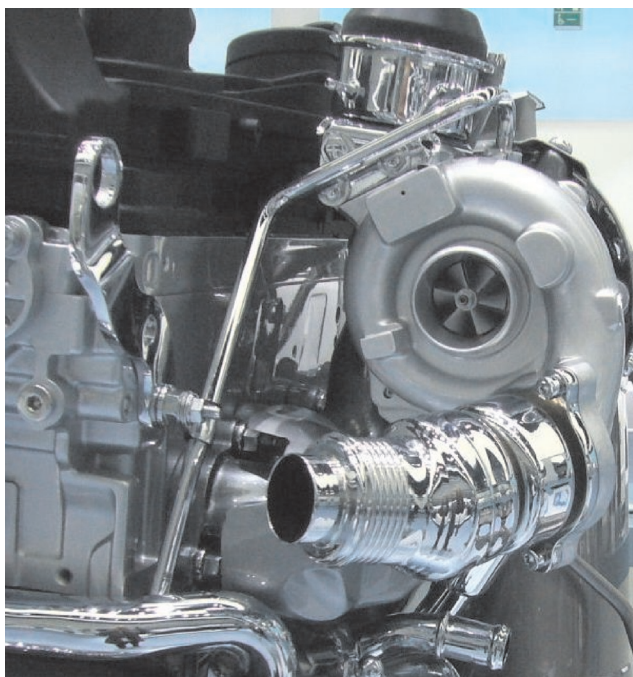
Rys. 3. Jednotłoczkowa pompa wysokiego ciśnienia typu Bosch CP 4.1 [1]

Wtrysk paliwa realizowany jest 8-otworkowymi, piezoelektrycznymi wtryskiwaczami, pozwalającymi na podział dawki wtryskiwanego paliwa na siedem części. Proces wtrysku pełnej dawki podzielonej na siedem części w zależności od trybu pracy może następować w czasie 300° obrotu wału korbowego. Zarówno liczba otworków, stopień rozpylenia paliwa, jak i zasięg wtryskiwanej strugi zostały dopasowane do kształtu nowej komory spalania. W miejsce stosowanej wcześniej komory typu Omega zastosowano nową komorę o większej średnicy i płaskim kształcie, której forma zapobiega tworzeniu się obszarów o bogatszej mieszance, bardziej skłonnej do tworzenia cząstek stałych podczas spalania.

W celu zwiększenia zawiorowania powietrza napływającego do cylindrów, w układzie dolotowym zastosowano dwa oddzielne kanały dolotowe oraz system elektronicznie sterowanych przepustnic, których zadaniem jest zwiększenie prędkości przepływu powietrza w zakresie częściowego obciążenia silnika.

Zastosowana turbosprężarka z pneumatycznie sterowanym położeniem kierownic napływu spalin została po raz pierwszy wyposażona w tłumik pulsacji sprężanego powietrza, który został umieszczony w korpusie bezpośrednio

przy sprężarce. Jego zadaniem jest zmniejszenie szumów przepływu powietrza.



Rys. 4. Turbosprężarka z tłumikiem pulsacji sprężanego powietrza [5]

Zastosowanie stopnia sprężania o wartości 16,5 może stwarzać problemy z rozruchem nienagrzanego silnika. W związku z tym zastosowano rozrusznik o zwiększonej mocy, który podczas zimnego rozruchu gwarantuje prędkość obrotową silnika wynoszącą 450 obr/min. Ponadto zastosowano świece żarowe nowego typu z metalowym rdzeniem grzejnym (rys. 6).



Rys. 5. Moduł oczyszczania spalin [5]

Układ oczyszczania spalin składa się z katalitycznego reaktora utleniającego oraz filtra cząstek stałych. Są one szeregowo umieszczone we wspólnej obudowie, a całość zabudowana jest w formie modułu oczyszczania spalin bezpośrednio na silniku przy kolektorze wylotowym (rys. 4). W celu szybszego nagrzewania aktywnych powierzchni reaktora zastosowano metalowe rdzenie, zamiast zwykle stosowanych rdzeni ceramicznych. Rdzeń filtra otrzymał tzw. strefowe pokrycie katalityczne stopem platyny i paladu, dzięki czemu odznacza się dużą trwałością oraz małą bezwładnością cieplną i może prawidłowo działać w krótkim czasie po rozruchu zimnego silnika. Regeneracja filtra realizowana jest samoczynnie przez odpowiednie sterowanie składem mieszanki w celu uzyskania wymaganej temperatury, przy której następuje wypalanie cząstek zalegających na powierzchniach katalitycznych filtra.

Nowy silnik został również wyposażony w tzw. niskotemperaturowy układ recyrkulacji spalin, który znacząco zmniejsza emisję tlenków azotu. Do chłodzenia spalin zastosowano chłodnicę typu ciecz–spaliny o maksymalnej mocy 8 kW, co uzyskano dzięki dodatkowej, elektrycznej pompie cieczy chłodzącej, powodującej szybszy przepływ cieczy przez chłodnicę.

W stosunku do poprzedniej wersji z zasilaniem pompowtryskiwaczami, nowy silnik odznacza się znacznie zmniejszoną głośnością pracy. Przyczynił się do tego zarówno nowy system zasilania silnika, jak i zastosowanie tłumika pulsacji powietrza oraz lepszej izolacji akustycznej całej jednostki napędowej.

### 3. Cechy konstrukcyjne silnika 2.0 TDI w wersji amerykańskiej

Jednym ze skutków światowego kryzysu ekonomicznego była w ostatnich dwóch latach zmiana preferencji na amerykańskim rynku samochodowym. Wzrost ceny paliw spowodował znaczące zainteresowanie pojazdami wyposażonymi w oszczędne źródła napędu. Początkowo nastąpił znaczny wzrost popularności pojazdów wyposażonych w hybrydowe układy napędowe. W krótkim czasie okazało się, że efekty zmniejszenia zużycia paliwa przez te pojazdy są odczuwalne jedynie w niektórych warunkach ruchu, w których można odzyskać energię hamowania i często korzystać z systemu „start-stop”, a silnik pracuje w warunkach nieustalonych. Odpowiada to zwykle eksploatacji w intensywnym ruchu miejskim, podczas gdy najczęściej pojazdów trafia do odbiorców na amerykańskiej prowincji, gdzie warunki ruchu są zupełnie inne. Z tych względów na kontynencie amerykańskim znacznie wzrosło zainteresowanie pojazdami wyposażonymi w silniki z zapłonem samoczynnym. Należy przy tym zaznaczyć, że ceny detaliczne oleju napędowego w USA są zbliżone do cen benzyny silnikowej, w związku z tym jedyną motywacją nabywców do zakupu pojazdu wyposażonego w silnik o zapłonie samoczynnym jest mniejsze zużycie paliwa.

Podstawowym warunkiem obecności tego typu pojazdów na rynku amerykańskim jest zagwarantowanie osiągnięć nie gorszych niż pojazdów z jednostkami benzynowymi oraz

spełnienie bardzo wymagających przepisów dotyczących emisji toksycznych składników spalin. Specjalne wymagania dotyczą też funkcjonowania systemu diagnostyki pokładowej OBD (ang. *On-Board Diagnostic*), dla której ustalone zostały bardzo niskie wartości progowe, przy których silnik przechodzi w stan awaryjnej pracy. Powyższe wymagania dotyczą w szczególności stanów, w których obowiązują normy kalifornijskie. Innym poważnym problemem jest bardzo zróżnicowana jakość oleju napędowego oferowanego na kontynencie amerykańskim. Dotyczy to zarówno właściwości paliwa istotnych z punktu widzenia procesu spalania w silniku, jak i składu chemicznego, a szczególnie obecności siarki w paliwie.

Przy takich uwarunkowaniach firma Volkswagen jest jednym z nielicznych producentów samochodów, który od kilku lat z powodzeniem oferuje samochody osobowe wyposażone w silniki tego typu. W miejsce dotychczas oferowanego na rynku USA, Kanady i Meksyku silnika 1.9 TDI zasilanego pompowtryskiwaczami, montowanego w modelach Jetta i New Beetle, w 2008 r. został opracowany silnik 2.0 TDI przeznaczony do samochodów osobowych oferowanych na rynku amerykańskim. Ten silnik zasilany jest systemem wtrysku paliwa typu *common rail* i spełnia najostrzejsze normy emisji BIN5/LEV II. Podstawę konstrukcyjną tej nowej jednostki napędowej stanowił silnik 2.0 TDI oferowany na rynku europejskim, który spełnia wymagania normy Euro 5.

W celu osiągnięcia zamierzonego efektu i spełnienia wymagań normy BIN5/LEV II zastosowano zarówno zmiany w systemie spalania, jak i w systemie oczyszczania spalin.

Przebieg spalania został zmodyfikowany w nowym silniku przez wprowadzenie innego typu wtryskiwaczy i modyfikację pompy wysokiego ciśnienia zasilającej szynę ciśnieniową. Zmieniono także przebieg dawkowania paliwa oraz wprowadzono dwuobiegowy system recyrkulacji spalin.

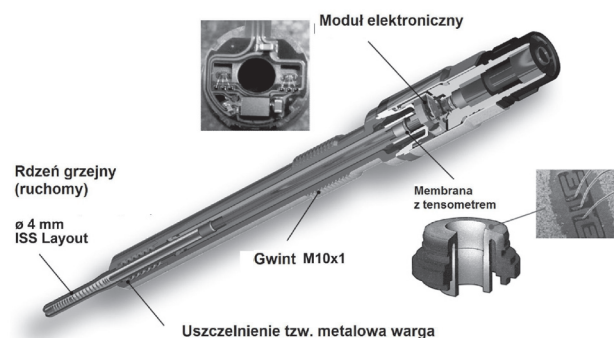
Modyfikacje piezoelektrycznych wtryskiwaczy dotyczyły zmniejszenia średnicy otworków rozpylacza (z średnicy 0,123 mm na 0,117 mm) i zmniejszenia ich długości (do 0,85 mm) przy jednoczesnym zwiększeniu ciśnienia wtrysku paliwa w całym zakresie pracy silnika. W ten sposób uzyskano lepsze rozpylenie paliwa oraz zwiększono zasięg strugi i zmniejszono możliwość koksowania paliwa na powierzchni rozpylacza, a wprowadzone zmiany nie spowodowały zwiększenia głośności pracy silnika. Ponadto struga wtryskiwanego paliwa, w postaci stożka o kącie 162°, została lepiej dopasowana do kształtu komory spalania. Uzyskany efekt był możliwy dzięki wprowadzeniu nowej technologii wytwarzania wtryskiwaczy, znanej pod nazwą EDM (*Electrical Discharge Machining*), która umożliwiła uzyskanie odpowiedniej tolerancji wykonania zaprojektowanej geometrii otworków.

Układ sterowania silnika został dopasowany do nowej strategii wtrysku paliwa. Podobnie jak w silniku bazowym dawka jest wtryskiwana w siedmiu częściach, przy czym w nowym silniku zmniejszono wielkość pierwszej dawki pilotującej i powtrysku oraz zwiększono dokładność dozo-

wania, szczególnie w zakresie małego obciążenia silnika, kiedy dawki wtryskiwanego paliwa są najmniejsze. Nowa strategia wtrysku przewiduje ponadto krótszy odstęp czasu pomiędzy dawką pilotującą a dawką następną oraz realizację powtrysku w postaci dwóch małych dawek następujących po sobie w krótkim odstępie czasu. Takie działanie sprzyja stabilności rozwoju płomienia oraz zmniejszeniu powstawania sadzy i tlenków azotu w pierwszej fazie spalania, natomiast w ostatniej fazie spalania sprzyja utlenianiu sadzy w szerokim zakresie pracy silnika. W efekcie uzyskano ponad 20-procentowe zmniejszenie emisji cząstek stałych oraz znaczące zmniejszenie stężenia węglowodorów zawartych w surowych spalinach.

W silniku 2.0 TDI spełniającym normy emisji BIN5/LEV II po raz pierwszy zastosowano system indywidualnego sterowania procesem spalania zależny od wartości ciśnienia spalania w poszczególnych cylindrach.

Do pomiaru ciśnienia czynnika w komorze spalania wykorzystano zmodyfikowane świece żarowe, wyposażając je w tzw. ruchomy rdzeń grzejny. W zależności od chwilowej wartości ciśnienia w cylindrze ruchomy rdzeń grzejny świecy przemieszcza się, a jego ruch jest przenoszony na membranę z czujnikami tensometrycznymi, wyposażonymi w system kompensacji termicznej. Membrana umieszczona jest w górnej części świecy żarowej, przez co nie jest bezpośrednio narażona na działanie ciśnienia oraz na działanie wysokiej temperatury. Pomiar wykorzystywany jest do obliczenia ciśnienia indykowanego w każdym obiegu na podstawie zmierzonej wartości maksymalnego ciśnienia oraz położenia względem górnego zwrotnego położenia. Tego typu pomiar i obliczenia prowadzone są w czasie rzeczywistym w każdym z cylindrów. W zależności od wyników obliczeń dobierane są sekwencje dawkowania paliwa do cylindra, co umożliwia kontrolę przebiegu spalania. Wymiernym efektem jest możliwość znacznego zmniejszenia emisji tlenków azotu i cząstek stałych, a także zapewnienie prawidłowej pracy silnika na paliwie o gorszej jakości (np. o mniejszej liczbie cetanowej).



Rys. 6. Świeca żarowa silnika 2.0 TDI spełniającego amerykańskie normy emisji BIN5/LEV II [2]

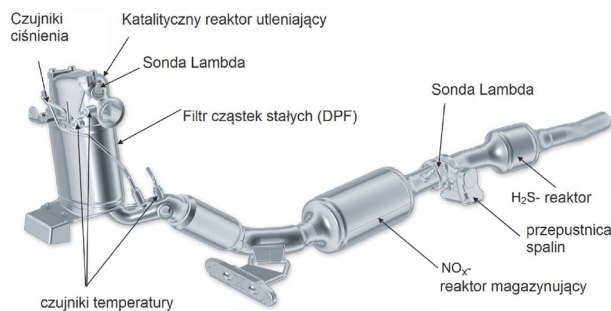
Przyjęty sposób oceny przebiegu spalania pozwala na zastosowanie innych czynności regulacyjnych w zależności od wartości ciśnienia w pojedynczym cyklu pracy. Ten system wykorzystuje się do kompensacji indywidualnych

sygnałów sterujących w każdym z cylindrów w zależności od niedokładności pomiaru dawki wtryskiwanego paliwa, niedokładności wykonania systemu spalania, jakości paliwa, czy też od różnych zmiennych wielkości wpływających na wartość ciśnienia indykowanego. Taki sposób kontroli systemu spalania może stanowić podstawę do stosowania w określonych przedziałach pracy silnika homogenizacji mieszanki palnej.

W celu zmniejszenia emisji tlenków azotu w surowych spalinach zastosowano nowy system recyrkulacji spalin złożony z układu nisko- i wysokociśnieniowej recyrkulacji. W systemie niskociśnieniowym spaliny są pobierane z układu wylotowego za filtrem cząstek stałych, następnie są oczyszczane w katalitycznym reaktorze utleniającym, chłodzone w chłodnicy o mocy 8 kW i doprowadzane do strefy mieszania ze strumieniem powietrza napływającego do sprężarki. W przypadku zbyt małej wartości ciśnienia spalin w układzie wylotowym, jego wartość jest podnoszona za pomocą przepustnicy regulacyjnej, umieszczonej w układzie wylotowym. Układ niskociśnieniowej recyrkulacji spalin nie wpływa na zmniejszenie entalpii spalin napędzających turbinę, stwarza możliwość dobrego wymieszania spalin z powietrzem napływającym do silnika i przyczynia się do zmniejszenia emisji tlenków azotu w szerokim zakresie pola pracy silnika. W zakresie większego obciążenia niskociśnieniowa recyrkulacja spalin jest uzupełniana recyrkulacją wysokociśnieniową, dzięki czemu możliwe jest uzyskanie dużego stopnia recyrkulacji spalin bez występowania strat napełnienia cylindra. System recyrkulacji wysokociśnieniowej jest również wykorzystywany do stabilizacji termicznej ładunku podczas pracy silnika w skrajnie niskiej temperaturze otoczenia.

System oczyszczania spalin zawiera seryjny moduł składający się z katalitycznego reaktora utleniającego i z filtra cząstek stałych oraz dodatkowo z reaktora okresowo magazynującego tlenki azotu. Uzupełnieniem systemu oczyszczania spalin, specyficznym dla rynku amerykańskiego, gdzie oferowany olej napędowy często zawiera siarkę, jest dodatkowy reaktor katalityczny oczyszczający spaliny z siarkowodoru  $H_2S$ , powstającego podczas odsiarczania reaktora magazynującego tlenki azotu. W systemie oczysz-

czania spalin umieszczono dwie szerokopasmowe sondy lambda, z których pierwsza, umieszczona przed reaktorem utleniającym odpowiada za odpowiedni skład spalin z punktu widzenia pracy katalitycznego reaktora magazynującego. Współpracuje ona z drugą sondą lambda, umieszczoną za reaktorem magazynującym, która z kolei nadzoruje proces regeneracji reaktora. Uzupełnieniem systemu oczyszczania są trzy czujniki temperatury przekazujące sygnały do systemu diagnostyki pokładowej OBD oraz systemów regeneracji reaktora magazynującego.



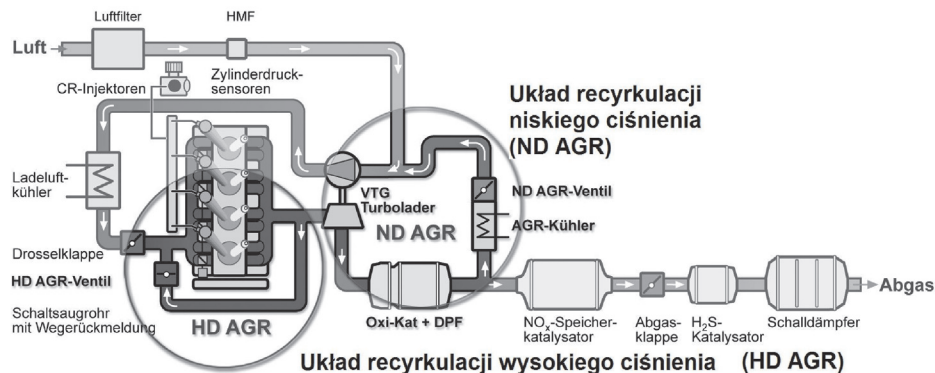
Rys. 8. Układ oczyszczania spalin silnika 2.0 TDI spełniającego amerykańskie normy emisji BINS/LEV II [2]

Proces regeneracji filtra cząstek stałych odbywa się przy zasilaniu silnika ubogą mieszanką w temperaturze ok. 650°C. W osiągnięciu wymaganej temperatury regeneracji pomagają egzotermiczne reakcje zachodzące w reaktorze utleniającym.

Regeneracja reaktora magazynującego tlenki azotu odbywa się z kolei podczas chwilowego wzbogacenia mieszanki w temperaturze 250–450°C. Czynnikiem redukującym tlenki azotu są wówczas zawarte w spalinach węglowodory HC, tlenek węgla CO oraz wolny wodór  $H_2$ .

Specyficzną cechą systemu oczyszczania spalin w układzie wylotowym silnika 2.0 TDI przeznaczonego na rynek amerykański jest konieczność stosowania okresowego odsiarczania reaktora magazynującego tlenki azotu. Siarka zawarta w paliwie tworzy w procesie spalania siarczany powodujące z czasem powolną dezaktywację katalitycznych powierzchni reaktora magazynującego. Siarczany charak-

teryzują się dużą stabilnością termiczną, a ich redukcja w procesie odsiarczania jest możliwa dopiero po przekroczeniu temperatury 620°C. W związku z tym proces odsiarczania przeprowadzany jest okresowo, przez wzbogacenie mieszanki, powodując chwilowy wzrost temperatury powyżej 620°C. Osiągnięcie tak wysokiej temperatury w reaktorze magazynującym jest możliwe dzięki dodatkowej dawce wtryskniętego paliwa pod koniec procesu spalania. W tym okresie paliwo nie



Rys. 7. Schemat układu recyrkulacji spalin – niskiego ciśnienia (ND AGR, niem. Niederdruck AbGasRezirkulation) i wysokiego ciśnienia (HD AGR, niem. Hochdruck AGR) [2]

wchodzi już w reakcję z pozostałością tlenu w spalinach, dzięki czemu nie następuje wzrost temperatury spalin stwarzający niebezpieczeństwo uszkodzenia turbosprężarki, natomiast proces utleniania zachodzi dopiero w reaktorze utleniającym, zwiększając temperaturę do wartości powyżej 620°C. W wyniku redukcji siarczanów powstaje siarkowodor  $H_2S$ , który z kolei w dodatkowym reaktorze jest zamieniany na dwutlenek siarki  $SO_2$ .

System oczyszczania spalin jest ściśle powiązany z układem zasilania, a całość jest stale nadzorowana przez układ sterowania silnika.

Zgodnie z wymaganiami amerykańskich norm, każdy z etapów oczyszczania spalin musi podlegać ocenie przez system diagnostyki pokładowej OBD. Działanie reaktora utleniającego jest oceniane przez sygnały z czujników temperatury odbierane podczas egzotermicznych reakcji zachodzących w czasie regeneracji filtra cząstek stałych. Z kolei informacje o prawidłowym działaniu reaktora magazynującego pochodzą z analizy sygnału obu sond lambda podczas regeneracji reaktora.

Spełnienie wymagań stawianych na rynku amerykańskim pojazdom wyposażonym w silniki z zapłonem samoczynnym nie jest prostym zadaniem, dlatego stworzenie w firmie Volkswagen wersji silnika 2,0 TDI dostosowanego do wymagań normy BIN 5/LEV II należy uznać za duży sukces, zwłaszcza biorąc pod uwagę złą jakość oleju napędowego oferowanego na tym rynku.

#### 4. Cechy konstrukcyjne silnika 2.0 TDI spełniającego wymagania normy Euro 6

Podobnie jak w przypadku silnika 2.0 TDI dostosowanego do amerykańskiej normy BIN 5/LEV II, również w wersji tej jednostki dostosowanej do normy Euro 6 podstawowym zadaniem jest zmniejszenie emisji tlenków azotu. Wynika to z faktu, że w stosunku do normy emisji Euro 5 następna z kolei norma Euro 6 przewidywana do wprowadzenia w 2014 r. zakłada zmniejszenie emisji tlenków azotu o ponad 50%. Przy opracowywaniu wersji silnika przeznaczonego na rynek amerykański należało wziąć pod uwagę inne czynniki, niż dla silnika przeznaczonego do eksploatacji w Europie. W pierwszym przypadku należało uwzględnić złą jakość oleju napędowego, jego zanieczyszczenie, jak również stan infrastruktury technicznej i przyzwyczajenia nabywców. Z tego względu na rynek amerykański opracowano silnik, który nie wymaga dodatkowych czynności obsługowych i jest wyposażony w system odporny na skutki używania paliwa o gorszej jakości.

Na rynku europejskim można było skorzystać z doświadczeń zdobytych podczas eksploatacji pojazdów ciężarowych, w których powszechnie stosowane jest zmniejszanie emisji tlenków azotu metodą selektywnej redukcji katalitycznej (SCR), przy wykorzystaniu do tego powszechnie dostępnego w Europie wodnego roztworu mocznika o handlowej nazwie AdBlue.

Tę metodę, wraz z niezbędnymi zmianami w systemie sterowania, wprowadzono w silniku VW 2.0 TDI spełniającym wymagania normy Euro 6, który pod handlową

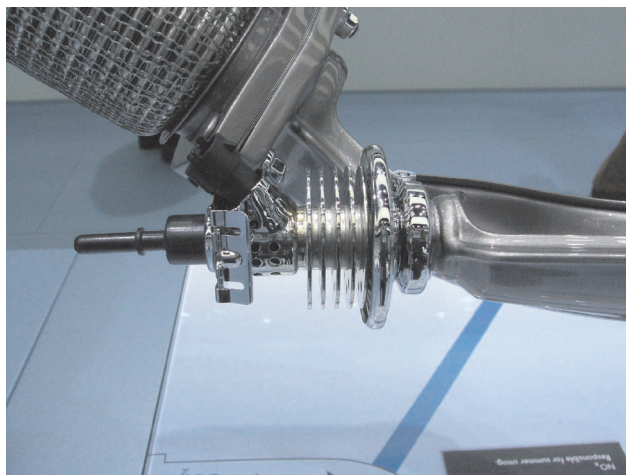
nazwą BlueTDI jest już oferowany w wybranych modelach przeznaczonych na rynek europejski.

W systemie oczyszczania spalin pozostawiono seryjny moduł, znany z podstawowej wersji silnika i składający się z katalitycznego reaktora utleniającego i z filtra cząstek stałych. Wprowadzono natomiast dodatkowo katalityczny reaktor SCR oraz zawór dawkowania AdBlue, a w bagażniku samochodu umieszczono zbiornik AdBlue o objętości 17 dm<sup>3</sup>.



Rys. 9. Reaktor SCR silnika 2.0 BlueTDI [5]

Zastosowany czynnik redukujący AdBlue jest 32,5-procentowym eutektycznym roztworem wodnym mocznika, który jest cieczą niepalną i dość szybko ulega rozkładowi w środowisku, natomiast wchodzi w reakcje z niektórymi materiałami konstrukcyjnymi. Z tego względu zwrócono uwagę na odpowiedni dobór materiałów mających bezpośredni kontakt z tym czynnikiem, stosując części wykonane z polimerów lub niektórych stali stopowych, a unikając stali konstrukcyjnej, stopów cynku lub miedzi. Innym problemem jest zapewnienie płynności roztworu w niskiej temperaturze, ponieważ poniżej temperatury  $-11,5^{\circ}C$  roztwór krystalizuje się, w związku z tym przewidziano specjalny system ogrzewania. Po każdym wyłączeniu silnika czynnik ponownie wraca do zbiornika, pozostawiając puste zarówno przewody doprowadzające, jak i zawór wtrysku AdBlue. Problemem jest również utrata właściwości AdBlue pod wpływem temperatury wyższej niż  $40^{\circ}C$ , ponieważ rozpoczyna się jego powolny rozkład na amoniak i dwutlenek węgla.

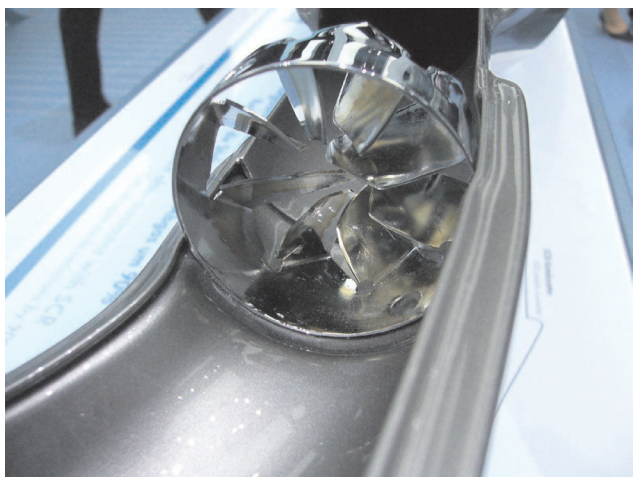


Rys. 10. Zawór wtrysku AdBlue [5]

Z tego powodu zbiornik AdBlue jest izolowany termicznie i dodatkowo wyposażony jest w zawór upustowy, natomiast układ sterujący stale nadzoruje wartość temperatury i ciśnienia w zbiorniku.

Czynnik redukujący AdBlue jest podawany do układu wylotowego przez elektronicznie sterowany zawór dawkujący, przy średnim ciśnieniu dawkowania wynoszącym 5 bar.

Korzystając ze specjalnie uformowanego fragmentu układu wylotowego, czynnik może być wtryskiwany w środek strumienia przepływających spalin, co zapobiega jego odkładaniu na ściankach i przyspiesza proces wymieszania i odparowania. Ponadto, bezpośrednio za zaworem, w tzw. strefie mieszania, umieszczono element powodujący zawrócenie strumienia spalin, przyspieszając tym wymieszanie i odparowanie AdBlue przed wejściem do reaktora SCR. Użycie tego typu mieszalnika gwarantuje równomierne pokrycie przekroju reaktora przez strumień spalin wymieszanych z czynnikiem redukcyjnym, co znacząco zwiększa efektywność redukcji.



Rys. 11. Mieszalnik AdBlue w układzie wylotowym silnika 2.0 BlueTDI [5]

Ze względu na proces redukcji w reaktorze SCR ważna jest wzajemna relacja w udziale NO i NO<sub>2</sub> w spalinach. Z tego też względu materiał i pokrycie katalityczne reaktora utleniającego i filtra cząstek stałych są nieco inne niż w reaktorach silnika spełniającego normę Euro 5. W układzie zawierającym reaktor SCR wielkość pokrycia katalitycznego a także stosunek masy platyny do palladu są tak dobrane, aby w procesie utleniania oraz regeneracji filtra nie powstawało zbyt dużo NO<sub>2</sub>.

Proces selektywnej redukcji katalitycznej zachodzi w metalowo-zeolityowym reaktorze SCR. Ze względu na konieczność zapewnienia aktywnej pracy reaktora w temperaturze poniżej 250°C, która jest typowa dla eksploatacji pojazdu w ruchu miejskim, bardzo ważny jest odpowiedni dobór materiału katalitycznego reaktora. W tym przypadku wybrane zostało pokrycie katalityczne Cu-zeolit, ponieważ badania redukcji tlenków azotu w teście NEDC wykazały przewagę tego materiału nad stosowanym często materiałem Fe-zeolit. Ponadto pokrycie katalityczne Cu-zeolit odznacza

się dużą odpornością na wysoką temperaturę i zachowuje swe walory przy pracy w temperaturze do 600°C podczas przebiegu pojazdu 160 tys. km.

Wszystkie wymienione zmiany konstrukcyjne dały efekt w postaci spełnienia z nadmiarem wymagań normy Euro 6, które będą obowiązywać dopiero po 2014 r. Należy także zaznaczyć, że dzięki rozwiązaniu problemu emisji tlenków azotu w silniku spełniającym normę emisji Euro 6 możliwe było zwiększenie mocy silnika o 2 kW w stosunku do standardowej wersji Euro 5.

## 5. Wnioski

Przytoczony wyżej przykład, w którym nowoczesny silnik w krótkim okresie po pierwszej prezentacji podlega dalszemu rozwojowi świadczy o dużym potencjale, który jeszcze tkwi w tego typu maszynach cieplnych. W tym przypadku rozwój nastąpił w kierunku spełnienia nowych, bardzo wymagających norm emisji toksycznych składników spalin, jakimi są: amerykańska norma BIN 5/LEV II lub europejska Euro 6. Udowodniono, że ten potencjał rozwojowy tkwi zarówno w konstrukcji samego silnika, jak też w metodach oczyszczania spalin poza silnikiem. W przypadku silnika oferowanego na rynku amerykańskim uwzględniono ponadto specyficzne warunki eksploatacji oraz jakość oferowanego tam paliwa. Na uznanie zasługuje także prowadzenie prac rozwojowych na długo przed wprowadzeniem kolejnej normy emisji spalin, co pozwala producentowi silników na lepsze przygotowanie się do podjęcia seryjnej produkcji oraz stanowi pomoc dla ustawodawców w opracowywaniu następnych regulacji prawnych. W podsumowaniu należy stwierdzić, że wszelkie opinie wskazujące na osiągnięcie już kresu rozwoju przez współczesne silniki spalinowe nie znajdują potwierdzenia w praktyce.

## Literatura

- [1] Rudolph F., Hadler J., Engler H.-J., Röpke S.: Der neue 2.0l 4V TDI mit Common-Rail–Moderne Dieseltechnologie von Volkswagen, 16. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2007.
- [2] Hadler J., Rudolph F., Dorenkamp R., Stehr H., Düsterdiek T., Hilzenderger J., Mannigel D., Kranzusch S., Veldten B., Kösters M., Specht A.: Der neue 2.0l TDI-Motor von Volkswagen zur Erfüllung niedrigster Abgasgrenzwerte, 29. Internationales Wiener Motorensymposium 2008.
- [3] Dorenkamp R., Hadler J., Rudolph F., Bühren F., Düsterdiek T., Gehrke V., Kösters M., Kuiken S.R., Schütte T.: Der neue 2.0l TDI-Motor von Volkswagen zur Erfüllung niedrigster Abgasgrenzwerte in Europa, 17. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2008.
- [4] Fabryczne materiały informacyjne – Volkswagen AG.
- [5] Materiały własne autora.

Mr. Marek Brzeżański, DSc., DEng. – Deputy Manager of the Institute of Automobiles and Internal Combustion Engines at Cracov University of Technology.

Dr hab. inż. Marek Brzeżański – wicedyrektor Instytutu Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych Politechniki Krakowskiej.

e-mail: [mbrzez@usk.pk.edu.pl](mailto:mbrzez@usk.pk.edu.pl)

