

Marek BRZEŹAŃSKI\*

## Nowy silnik V6 TDI firmy Audi z filtrem cząstek stałych

We wrześniu 2003 roku, na Wystawie Samochodów we Frankfurcie nad Menem, firma Audi zaprezentowała całkowicie nowy silnik V6 TDI, który wyposażony został w nową generację filtra cząstek stałych, nie wymagający stosowania jakichkolwiek dodatków do paliwa. Silnik ten od wiosny 2004 roku będzie montowany w luksusowej limuzynie Audi A8, a następnie w drugiej połowie 2004 roku znajdzie miejsce w nowym modelu Audi A6.

Słowa kluczowe: oczyszczanie spalin, cząstki stałe

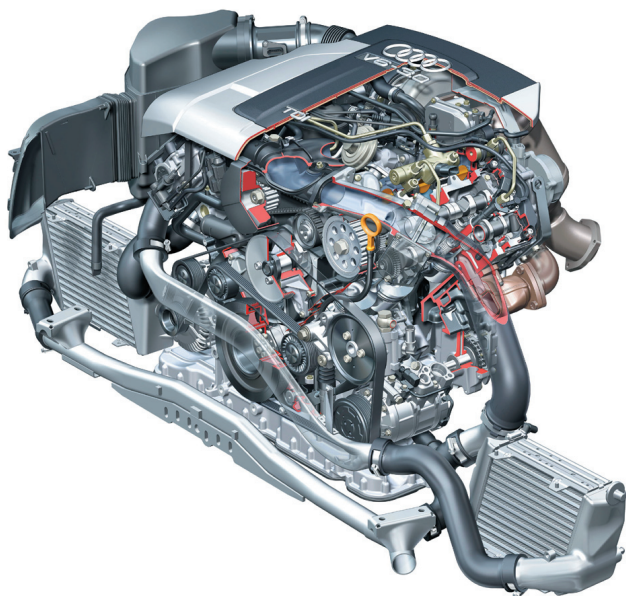
### 1. Dane ogólne

Nowy silnik (rys. 1), który jest obecnie najnowocześniejszą jednostką V6 o zapłonie samoczynnym, docelowo ma zastąpić oferowany od 1997 roku silnik V6 2,5 TDI (tab. 1).

Mimo większej objętości skokowej, silnik 3,0 dm<sup>3</sup> ma nieco mniejszą masę, która wynosi tylko 220 kg, dzięki czemu jest to obecnie najlżejsza na świecie jednostka V6 o zapłonie samoczynnym. Efekt ten osiągnięto głównie przez zastosowanie nowego rodzaju grafitowego żeliwa o symbolu GJV-400, z którego wykonano kadłub silnika. W stosunku do tradycyjnego

żeliwa szarego, masa kadłuba jest niższa o około 15%, przy dwukrotnym zwiększeniu parametrów wytrzymałościowych. Mimo zwiększonej średnicy cylindra oraz zwiększenia odległości pomiędzy cylindrami z 88 mm na 90 mm, wymiary zewnętrzne silnika pozostały nadal bardzo zwarte (długość silnika 440 mm).

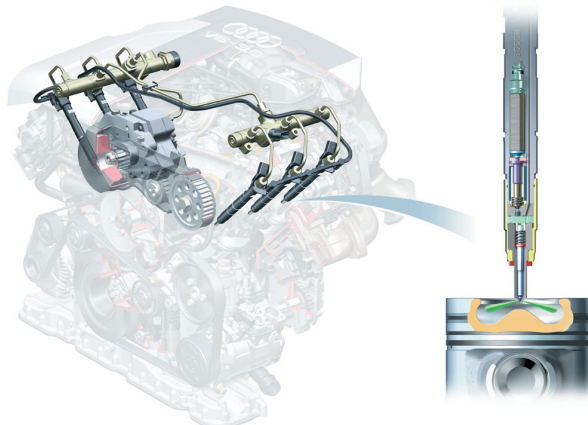
W celu zwiększenia trwałości i niezawodności silnika, wprowadzono napęd wałów rozrządu oraz pompy oleju za pomocą dwurzędowego łańcucha, rezygnując z pasa zębatego, stosowanego w silniku 2,5 dm<sup>3</sup>. Bez zmian pozostawiono układ czterech zaworów, sterujących wymianą ładunku w każdym z cylindrów oraz napęd zaworów za pomocą rolkowych popychaczy, wyposażonych w hydrauliczną regulację luzu zaworowego.



Rys. 1. Rozmieszczenie podzespołów w nowym silniku Audi V6 3,0 TDI

Tab. 1. Porównanie wybranych parametrów silników Audi: V6 2,5 TDI i V6 3,0 TDI

Wielkość	V6 2,5 TDI	V6 3,0 TDI
Objętość skokowa [cm <sup>3</sup> ]	2496	2967
Średnica cylindra x Skok tłoka [mm]	78,3 x 86,4	83,0 x 91,4
Stopień sprężania	18,5	17,0
Moc maksymalna [kW] przy prędkości obrotowej [obr./min]	132/4000	171/4000
Maks. moment obrotowy [N*m] przy prędkości obrotowej [obr./min]	370/1500-2500	450/1400-3250
Objętościowy wskaźnik mocy [kW/dm <sup>3</sup> ]	52,9	57,6
System zasilania	Pompa rozdzielczowa Bosch VP44	Common Rail Bosch CRIP II+
Maksymalne ciśnienie wtrysku [MPa]	145	160



Rys. 2. Układ zasilania silnika

### 2. Układ zasilania

Stosowana dotąd w silnikach Audi V6 TDI rozdzielczowa pompa wtryskowa VP44, zastąpiona została w nowym silniku najnowszej generacji systemem zasilania Common Rail – Bosch CRIP II+ (rys. 2).

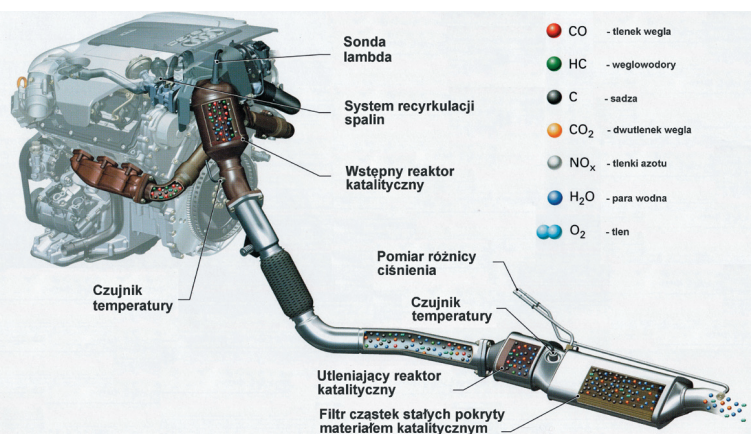
System ten zawiera klasyczne zasobniki ciśnienia o walcowej formie, po jednym na każdy rząd trzech cylindrów, co pozwala na stosowanie krótkich przewodów doprowadzających paliwo do wtryskiwacza. Niezbyt duża długość pojedynczego zasobnika gwarantuje uniknięcie problemów z falowym oddziaływaniem impulsów ciśnienia. Pompa wysokiego ciśnienia, napędzana oddzielnym pasem zębatym, umieszczona została pomiędzy rzędami cylindrów. Paliwo pod wysokim ciśnieniem podawane jest tylko do jednego z zasobników, z którego następnie podawane jest do drugiego z zasobników, dzięki czemu w obu zasobnikach uzyskiwana jest taka sama wartość ciśnienia. Maksymalna wartość ciśnienia uzyskiwanego w zasobnikach wynosi 160 MPa.

Najważniejszymi elementami układu zasilania nowego silnika pozostają jednak najnowszej generacji piezoelektryczne wtryskiwacze, opracowane w firmie Bosch. W stosunku do klasycznych wtryskiwaczy elektromechanicznych, masa iglicy otwierającej rozpylacz została zredukowana czterokrotnie (z 16 g na 4 g), dzięki czemu możliwe było dwukrotne zwiększenie jej prędkości przesuwu (1,3 m/s), co pozwala z kolei na większą dowolność w podziale dawki wtryskiwanego paliwa. W celu uzyskania odpowiednio miękkiej i cichej pracy silnika oraz małej emisji toksycznych związków spalin opracowano specjalną strategię podziału dawki. W zakresie małej prędkości obrotowej, oprócz dawki głównej, stosowane są dwie dawki pilotujące, a w zakresie średniej prędkości obrotowej jedna dawka pilotująca. Ponadto do prędkości obrotowej 2500 obr/min i średnich obciążeń stosowana jest również dawka powtrysku. Paliwo wtryskiwane jest do komory spalania poprzez 7-otworowy rozpylacz (rys. 2). Pracą układu zasilania zarządza system sterowania Bosch EDC-16, który ma wpływ m.in. na wartość dawki paliwa, początek wtrysku, ciśnienie doładowania oraz pracę układu recyrkulacji spalin.

W silniku V6 3,0 TDI zastosowano ponadto nowe, ceramiczne świece żarowe, dzięki którym nie tylko skrócono czas rozruchu silnika, lecz również znacznie ograniczono jego hałas w pierwszych cyklach po rozruchu.

### 3. System doładowania

Silnik wyposażony został w turbosprężarkę, która umieszczona została symetrycznie pomiędzy rzędami cylindrów (rys. 1). Takie położenie turbosprężarki stwarza możliwość zastosowania bardzo krótkich przewodów doprowadzających spaliny z obu kolektorów wylotowych i uniknięcia powstawania dużych strat ciepłych. Turbosprężarka wyposażona została w kierownicę o zmiennym kącie, przy czym regulacja ich położenia odbywa się elektrycznym siłownikiem, sterowanym z centralnego modułu sterującego. W systemie tym, w stosunku do klasycznej regulacji pneumatycznej, prędkość zmian położenia kierownic jest wielokrotnie większa, co przynosi znaczące efekty wzrostu ciśnienia, zwłaszcza przy małym obciążeniu silnika.



Rys. 3. Układ oczyszczania spalin

Wszystkie przewody dolotowe wykonane zostały z wysokiej jakości tworzyw sztucznych o gładkiej powierzchni wewnętrznej, gwarantującej niewielkie opory przepływu powietrza. W przewodach tych umieszczone zostały bezstopniowo regulowane przesłony, mające na celu zwiększenie zawiorowania ładunku przy małym obciążeniu silnika. Do poszczególnych rzędów cylindrów powietrze doprowadzane jest poprzez dwie odrębne chłodnice.

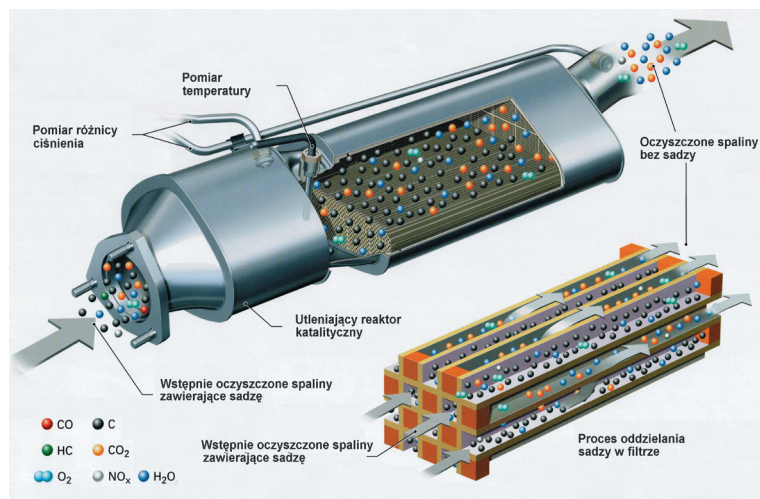
### 4. System oczyszczania spalin

Najbardziej interesującym rozwiązaniem w silniku V6 3,0 TDI jest jego układ oczyszczania spalin. Składa się z dwóch utleniających reaktorów katalitycznych, systemu recyrkulacji spalin EGR oraz filtra czstek stałych, budowanego według technologii zwanej CSF (*Catalysed Soot Filter*), czyli filtra, pokrywanego warstwą materiału katalitycznego (rys. 3).

Pierwszy z reaktorów katalitycznych, zwany reaktorem wstępnym, umieszczony jest bezpośrednio przy wylocie spalin z turbosprężarki. W celu uniknięcia strat ciepłych, zarówno przewody doprowadzające spaliny z kolektora wylotowego do turbosprężarki, jak i krótki przewód doprowadzający spaliny z turbosprężarki do wstępnego reaktora katalitycznego, mają budowę dwuwarstwową. Reaktor wstępny stwarza niewielkie opory przepływu i odznacza się małą bezwładnością cieplną, dzięki czemu już po kilkunastu sekundach pracy silnika rozpoczynają się w nim procesy utleniania tlenu węgla i węglowodorów.

Po nagraniu silnika i pracy przy większych obciążeniach zasadniczą rolę odgrywa główny reaktor utleniający o większej objętości, umieszczony pod podłogą pojazdu.

W celu obniżenia stężenia tlenków azotu w spalinach, silnik wyposażony został w elektronicznie sterowany system recyrkulacji spalin EGR (rys. 3), umieszczony pomiędzy rzędami cylindrów. System ten zawiera chłodnicę spalin, korzystającą z czynnika chłodzącego silnika, której funkcja podlega regulacji w zależności od temperatury i obciążenia silnika. W fazie nagrzewania silnika spaliny omijają chłodnicę, natomiast w miarę wzrostu temperatury spalin, strumień czynnika chłodzącego przepływającego przez chłodnicę zwiększa się, obniżając temperaturę recyrkulowanych spalin.



Rys. 4. Filtr czstek stałych silnika

Po przejściu przez dwa reaktory katalityczne, spaliny zawierające cząsteczki sadzy trafiają do filtra, którego struktura umożliwia zachodzenie procesu oddzielania cząsteczek sadzy od pozostałych składników spalin (rys. 4). Oddzielone cząsteczki osadzają się na aktywnych powierzchniach filtra, pokrytych materiałem katalitycznym, gdzie zachodzi ich utlenianie. Regeneracja filtra zachodzi w dwojaki sposób. Przy temperaturze spalin, wynoszącej przed filtrem 350–500°C, realizowany jest tzw. pasywny sposób regeneracji, polegający na ciągłym procesie utleniania sadzy zachodzącym na powierzchni aktywnej filtra i zamiany jej na dwutlenek węgla. W procesie tym cząsteczki sadzy nie odkładają się w filtrze. Jak wykazały przeprowadzone próby, taki stan pracy filtra jest typowy dla eksploatacji pojazdu w ruchu poza miejskim. Przy dłuższej eksploatacji silnika z małym obciążeniem, szczególnie w czasie intensywnego ruchu miejskiego, może jednak nastąpić zjawisko odkładania sadzy na powierzchni filtra. Realizowany jest wówczas tzw. aktywny sposób jego regeneracji, polegający na krótkotrwałym zwiększeniu temperatury spalin przed filtrem do wartości około 600°C i przyspieszeniu reakcji utleniania sadzy. Proces ten zachodzi dzięki chwilowemu zwiększeniu dawki paliwa i zmniejszeniu kąta opóźnienia wtrysku przez układ sterujący, po otrzymaniu odpowiedniego sygnału z czujników

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

ciśnienia, umieszczonych przed i za filtrem. Przeprowadzone próby drogowe wykazały, że przy typowej eksploatacji pojazdu, aktywny sposób regeneracji filtra następuje dopiero po przebiegu około 1000-1200 km. Tak rzadko występujący proces aktywnej regeneracji filtra nie ma praktycznie żadnego wpływu na wartość eksploatacyjnego zużycia paliwa.

## 5. Wnioski końcowe

Nowy silnik o zapłonie samoczynnym V6 3,0 TDI firmy Audi jest pierwszą, seryjnie produkowaną jednostką tego typu, która na życzenie może zostać wyposażona w filtr cząstek stałych, nie wymagający przy tym żadnych dodatków do paliwa. Należy przy tym zaznaczyć, że od wiosny 2004 roku będzie on oferowany w modelu Audi A8 zarówno w wersji bez filtra cząstek stałych, jak i w wersji z filtrem. W obu wersjach spełnia on wymagania normy EURO IV, która dla już produkowanych silników obowiązywać będzie dopiero od 2006 roku. W wydaniu z filtrem spełnia on wymagania tej normy ze znacznym nadmiarem. Jak dotąd producent nie podał jeszcze ceny nowego filtra. Biorąc pod uwagę doświadczenia eksploatacyjne z oferowanymi dotąd filtrami, należy przypuszczać, że opisany powyżej sposób oczyszczania spalin silnika o zapłonie samoczynnym, stanie się już wkrótce obowiązującym standardem.

W opracowaniu wykorzystano materiały prasowe i zdjęcia firmy Audi AG (wrzesień 2003)

## Aktualności

### Silniki o ZI z wtryskiem bezpośrednim

#### Ford 1.8 SCi

Ford wprowadził do sprzedaży (w modelu Mondeo) silnik o ZI z bezpośrednim wtryskiem benzyny oznaczony SCi (Smart Charge injection). Jest to 4-cylindrowy, rzędowy silnik o pojemności skokowej 1798 cm<sup>3</sup>, chłodzony cieczą. Głowica jest wyposażona w 4 zawory na cylinder napędzane dwoma wałkami rozrządu umieszczonymi w głowicy. Podwójne kanały dolotowe sterowane są przepustnicami za pośrednictwem układu elektronicznego. Silnik ten – podobnie jak znany silnik Mitsubishi GDI – umożliwia pracę na ubogich mieszankach w zakresie małych i średnich obciążeń. Dla zapewnienia zapłonu ubogich mieszanek zastosowano specjalną świecę zapłonową o zwiększonej energii iskry elektrycznej, umieszczoną centralnie. Asymetryczna komora spalania umieszczona jest w tłoku.

Silnik rozwija moc 96 kW (130 KM) przy 6000 obr/min oraz maksymalny moment obrotowy 175 Nm przy 4250 obr/min. Przebiegowe zużycie paliwa ocenia się jako 6-8% niższe od porównywalnego samochodu z silnikiem 120 KM, choć zwraca się uwagę na nieco gorszą dynamikę.

Oprac. na podst. *Auto Świat* 31 z dn. 30.07.2003

#### Silniki FSI firmy Volkswagen

Volkswagen w nowym modelu samochodu Golf zamierza montować 2 wersje silników FSI – silników o ZI z bezpośrednim wtryskiem. Będą to jednostki 4-cylindrowe: o pojemności

skokowej 1600 cm<sup>3</sup> i mocy 63 kW (86 KM) oraz 2000 cm<sup>3</sup> o mocy 110 kW (150 KM) i maksymalnym momencie obrotowym 200 Nm. Montowane będą także inne silniki, w tym silnik typu TDI (o ZS, z wtryskiem bezpośrednim) o mocy 118 kW (160 KM).

Oprac. na podst. *Auto Świat* 32 z dn. 6.08.2003

#### Nowy silnik V6 Forda

Firma Ford wprowadza do swego nowego modelu Mustang od wiosny 2004 r. nowe silniki V6 i V8. Silnik V6 jest jednostką o pojemności 4,0 dm<sup>3</sup> rozwijającą moc 150 kW przy 5250 obr/min oraz maksymalny moment obrotowy 318 Nm przy 3500 obr/min ( $p_{e,max}=1,0$  MPa). Silnik V8 o pojemności 4,6 dm<sup>3</sup> rozwija moc 224 kW przy 6000 obr/min zaś moment obrotowy – 427 Nm ( $p_{e,max}=1,17$  MPa) przy 4500 obr/min. Oba rzędy cylindrów silnika rozchylone są pod kątem 60°, a między nimi mieści się układ dolotowy pozwalający na uzyskanie efektu doładowania dynamicznego. Silniki posiadają pojedyncze wałki rozrządu w głowicach napędzane łańcuchem; silnik V6 posiada 2 zawory na cylinder, silnik V8 – 3 zawory na cylinder. Wg danych fabrycznych oba silniki spełniają normy ULEV II.

Oprac. na podst. *Automotive Engineering Intern.*, Styczeń 2004

#### Nowy, 6-cio cylindrowy silnik typu boxer firmy Subaru

Firma Subaru wprowadziła na rynek silnik ZE30-R, który jest unowocześnioną wersją silnika ZE30 wprowadzonego do produkcji w 2000 r. Jest to sześciocylindrowy silnik z przeciwnym układem tłoków; modyfikacji poddano ok. 80% jego