

# Electronică pentru Automobile

## Prelegerea nr. 15

### SISTEME ELECTRONICE PENTRU MOTOARE DIESEL Partea III

---



## Sistemul de injecție de motorină cu acumulator rampă comună (Common-Rail)

Necesitățile în creștere privind o economicitate mai mare, nivel de noxe mai mic, împreună cu cerințele de reducere a zgomotului motoarelor Diesel nu mai pot fi realizate prin folosirea sistemelor de injecție cu control mecanic.

Pentru a îndeplini cerințele de mai sus sunt necesare presiuni de injecție foarte mari, în corespondență cu o curbă precisă a vitezei de descărcare și cantități injectate de motorină dozate cu exactitate.



Una din noile dezvoltări în domeniu cuprinde un sistem cu acumulator de motorină, așa-numita "rampă" ("*common-rail*") care este în permanență sub presiune, un sistem special de alimentare la înaltă presiune, injectoare și un sistem de control electronic care îndeplinește cu precizie funcții de control dintre cele mai complicate.

Sistemul nu are nici o problemă cu îndeplinirea celor mai severe norme legislative actuale privind noxele de evacuare și nici cu cele privind specificațiile de viitor.



## Structura sistemului rampă comună (common-rail)

În sistemele de injecție Diesel cu injecție directă, pompa produce presiune înaltă în motorină de fiecare dată când are loc injecția. În sistemul cu rampă comună, înalta presiune se dezvoltă în mod independent de ordinea de injecție și este permanent disponibilă în conducta de motorină.

Cu alte cuvinte, obținerea înaltei presiuni și injecția au loc în mod independent. Această tehnologie face posibilă satisfacerea acelor cerințe ce afectează în mod favorabil consumul și emisiile de noxe. Presiunea înaltă este în acest mod disponibilă chiar și la turații reduse ale motorului.



Cea mai importantă condiție pentru acest mod de lucru este prezența unui acumulator în care înalta presiune de injecție este păstrată constantă la o valoare care să nu scadă niciodată sub 1350 bari (generațiile noi sub 1600 bari). Această funcție revine conductei comune de motorină (rampă).

La rampă se conectează injectoarele (duze cu șase orificii). Începutul injecției și dozarea cantității de motorină (sfârșitul injecției) sunt controlate cu un singur electroventil cu viteză mare de comutare.



### Avantajele sistemului cu rampă comună:

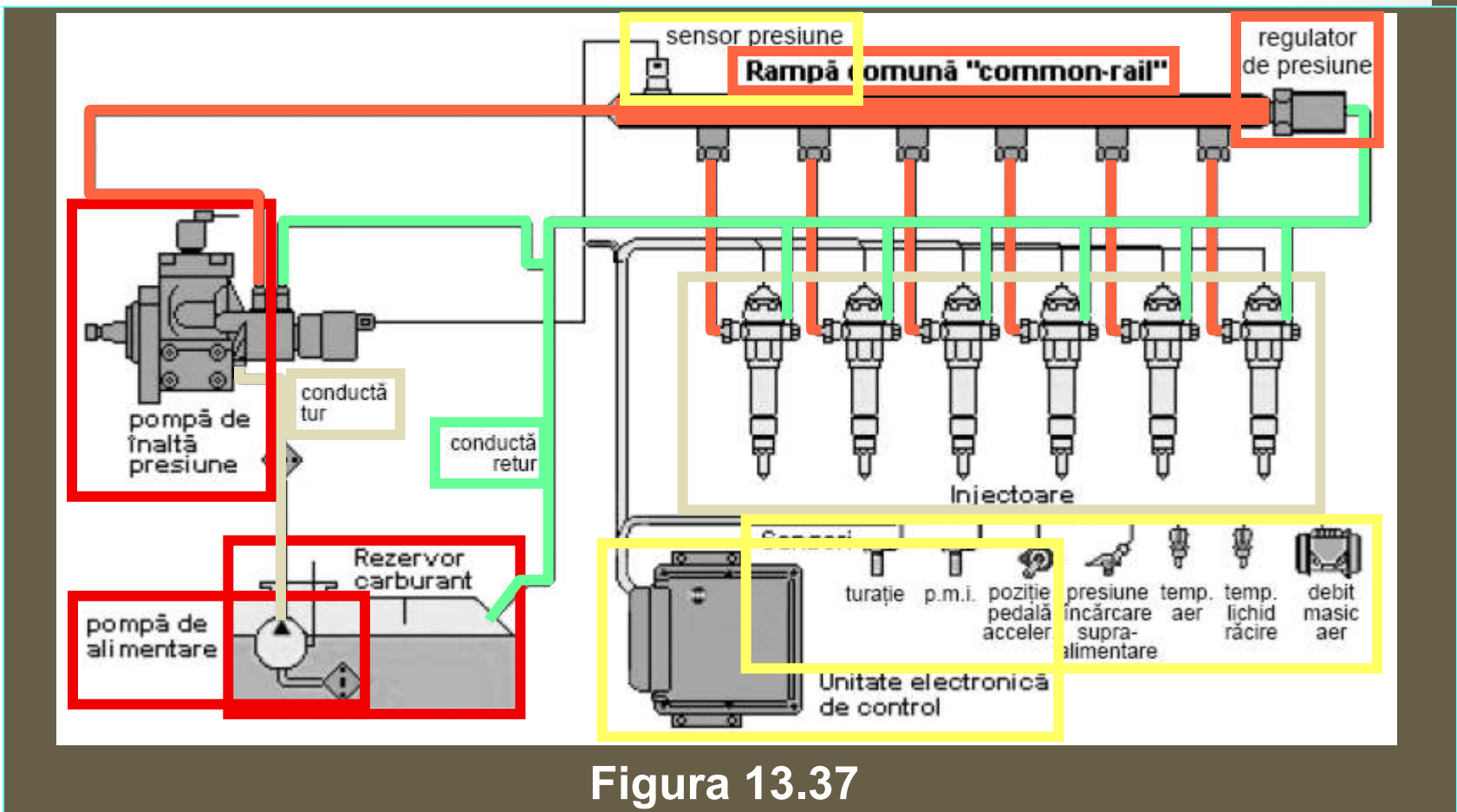
- sincronizarea și cantitatea de motorină injectată sunt controlate printr-un singur electroventil;
- libertate de alegere a presiunii de injecție (în domeniul caracteristicii);
- presiuni de injecție înalte la turații reduse;
- flexibilitatea începutului injecției - avansare și întârziere;
- reglaje ușoare pentru adaptare la condițiile de funcționare ale motorului;
- se poate folosi injecție pilot ce asigură o creștere lină a presiunii și o ardere mai calmă (vibrații mai mici), precum și noxe de evacuare mai reduse datorită unei arderi mai complete.



Pentru generațiile noi de sisteme common-rail, cu presiuni de injecție de 1600 - 2000 bari se folosesc în locul injectoarelor electrohidraulice (Bosch) injectoare piezoelectrice (Siemens). Acestea asigură timpi de comutație mai mici, ceea ce permite satisfacerea celor mai stricte condiții din standardele privind gazele de evacuare. În plus, sistemul are perspectiva reală de a deveni din ce în ce mai economic.

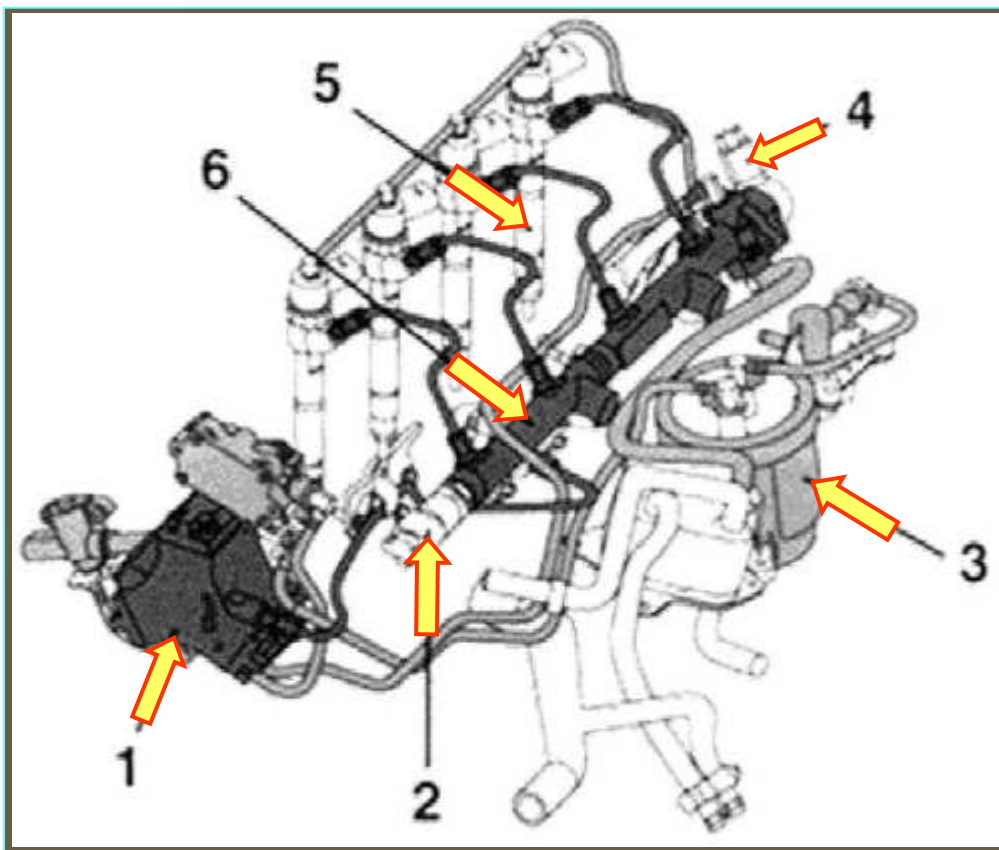
În figura 13.37 se prezintă structura unui sistem de injecție common-rail, iar în figura 13.38 o imagine sugestivă cu amplasarea principalelor părți componente.





**Figura 13.37**





- 1 – pompă de înaltă presiune;
- 2 – sensor de presiune;
- 3 – radiator motorină;
- 4 – regulator de presiune;
- 5 – injector;
- 6 – rampă comună (common-rail).

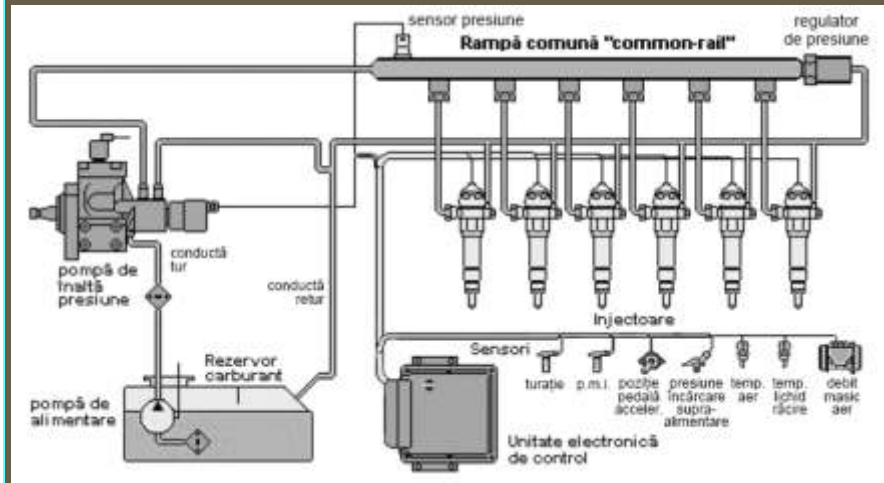
Figura 13.38



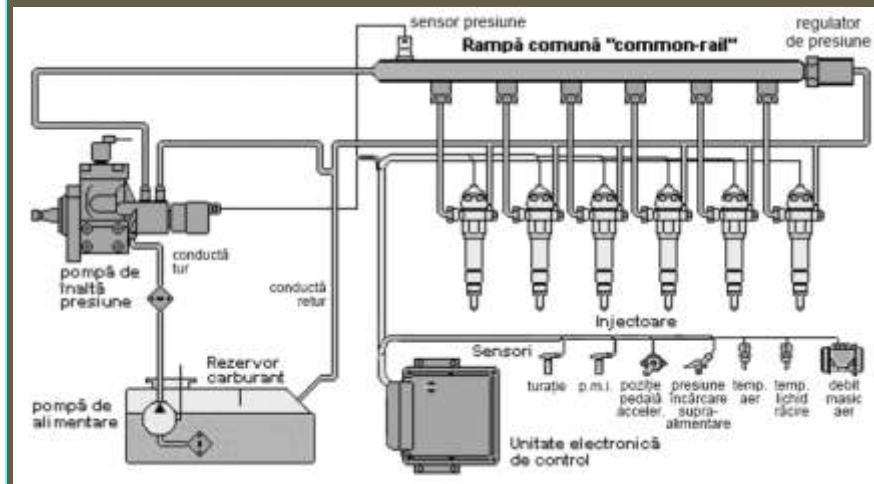
Sistemul de injecție cu rampă comună și injectoare piezoelectrice cu acționare directă. Sursa: Delphi

Înalta presiune este produsă de o pompă de înaltă presiune cu funcționare radială. Pentru un anumit punct de funcționare, presiunea din sistemul de înaltă presiune este controlată de o supapă de control a presiunii. Controlul electronic al motorului reglează presiunea de injecție funcție de turație și de sarcină.

Informația de la sensorul de mișcare a arborelui cotit (turație și poziție unghiulară) și a axei cu came (sensor de poziție - cilindrul 1 în faza de compresie) servesc unității electronice de control a motorului ca bază pentru stabilirea unei valori precise a presiunii de injecție.



Sensori de temperatură informează despre temperatura aerului, motorinei și motorului. Valorile lor afectează de asemenea înalta presiune din rampă. Cererea de accelerație de la conducătorul auto este identificată cu ajutorul unui sensor de acționare (deplasare) a pedalei de accelerație (sistemul "e-gas").



Microcomputerul calculează durata de deschidere a electroinjectoarelor - și astfel cantitatea de motorină injectată - ca o variabilă ce depinde de condițiile de funcționare sau de puterea cerută. Când controlul închide electroinjectoarele, injecția se oprește imediat.

## *Pompa de înaltă presiune*

Construcția pompei de înaltă presiune este specifică sistemului și cuprinde trei pistoane radiale decalate la  $120^\circ$ . Pistoanele sunt comandate de un excentric printr-un pinion intermediar antrenat de cureaua de distribuție.

Pompa de înaltă presiune alimentează rampa comună, iar debitul său este dependent de turația motorului. Înalta presiune este controlată de un regulator de presiune conectat la capătul rampei.

În figura 13.39 se prezintă structura pompei de înaltă presiune.



- 1 – canal de refulare;
- 2 – împingător;
- 3 – excentric
- 4 – supapă de intrare;
- 5 – supapă;
- 6 – aspirație;
- 7 – supapă;
- 8 – piston;
- 9 – resort;
- 10 – supapă de ieșire.

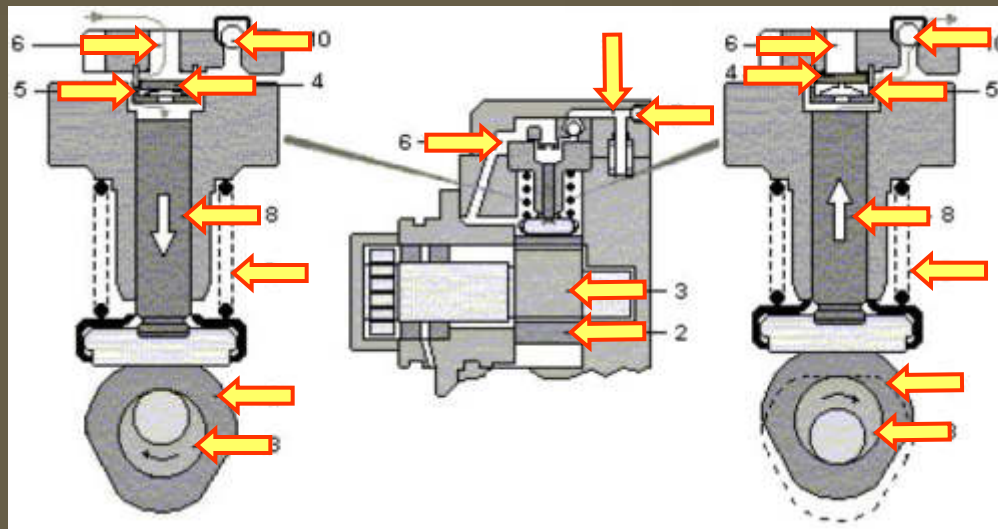


Figura 13.39

Funcționarea pompei, conform figurii 13.39 care prezintă un detaliu cu unul din cele trei pistoane, cuprinde faza de aspirație a motorinei (stânga) și faza de refulare (dreapta).

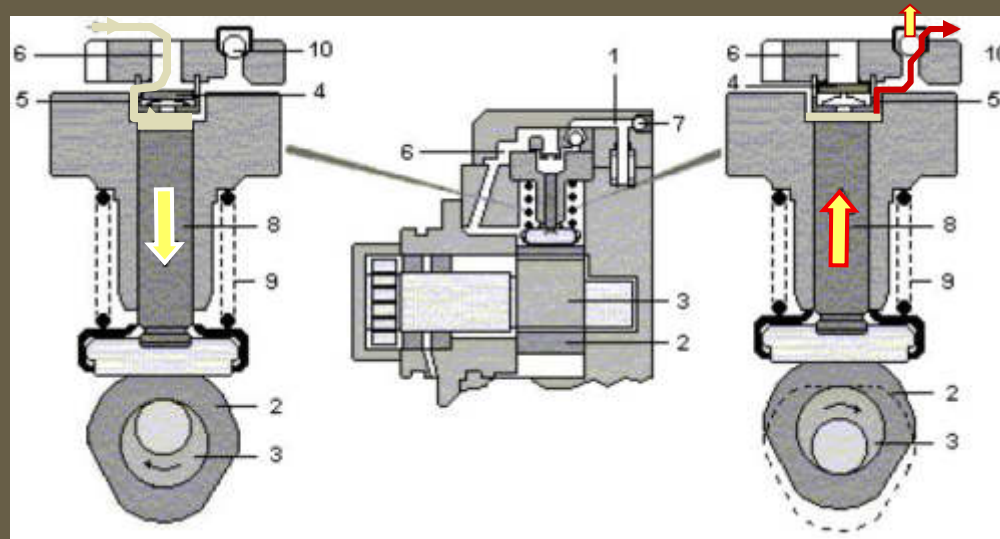


Figura 13.39

## *Sensorul de presiune din rampă*

**Destinație.** Pentru a furniza unității electronice de control tensiune de semnal ce corespunde presiunii aplicate, sensorul de presiune din rampă trebuie să măsoare presiunea instantanee din rampă:

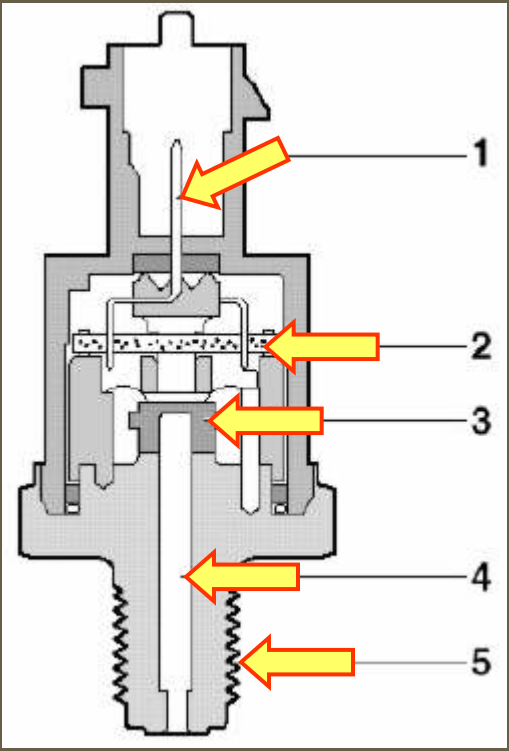
- cu acuratețea corespunzătoare;
- cât mai rapid posibil.

**Proiectare și construcție.** Sensorul de presiune din rampă cuprinde următoarele componente (figura 13.40):

- un sensor integrat sudat pe fittingul de presiune;
- placă de circuit imprimat cu circuitul electric de evaluare;
- un corp pentru sensor cu conector electric.

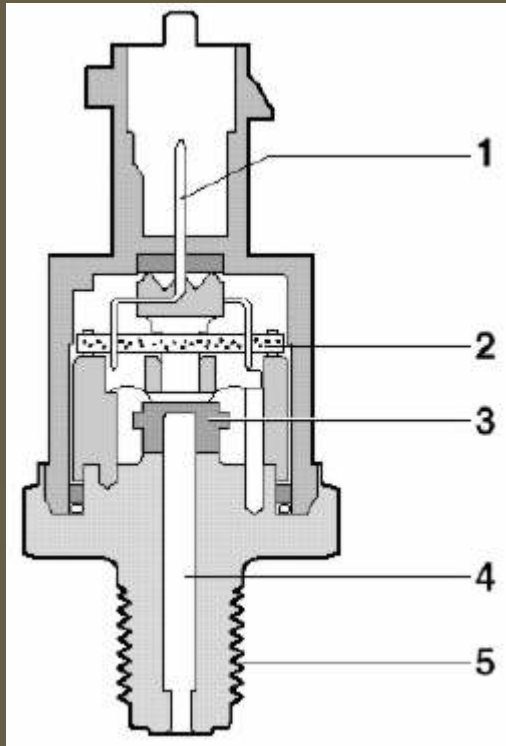






- 1 – conexiune electrică;
- 2 – circuit de evaluare;
- 3 – diafragmă metalică cu sensor;
- 4 – racord de înaltă presiune;
- 5 – filet de montare.

Figura 13.40



**Figura 13.40**

Motorina curge spre sensorul de presiune din rampă printr-o deschidere din rampă, a cărei capăt este închis de diafragma sensorului. Motorina sub presiune ajunge la diafragma sensorului printr-o gaură înfundată.

Elementul sensor (dispozitiv semiconductor) pentru conversia presiunii la semnal electric este montat pe această diafragmă. Semnalul generat de sensor este aplicat unui circuit de condiționare, care îl amplifică și îl trimite unității electronice de control (ECU).

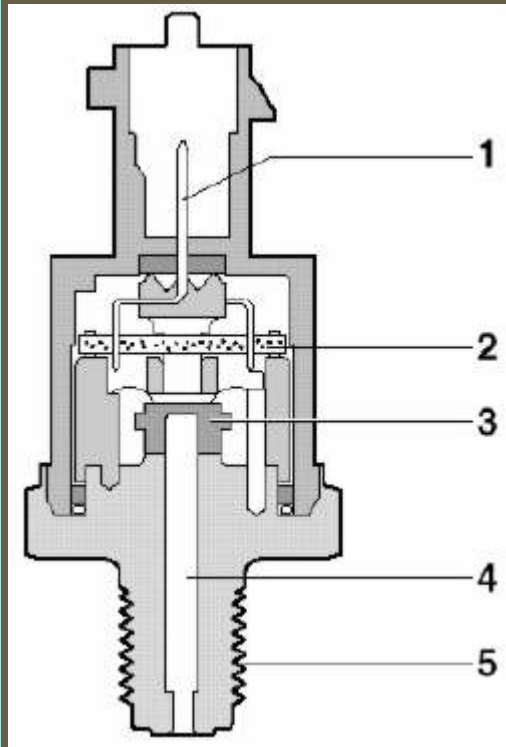
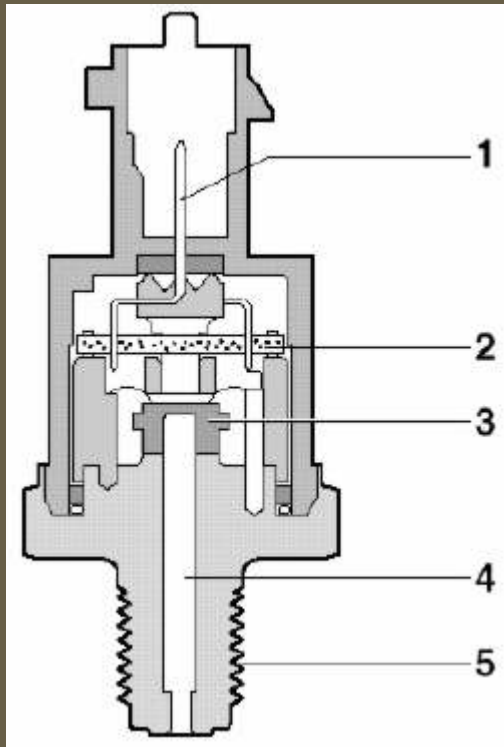


Figura 13.40

**Funcționare.** Sensorul de presiune din rampă funcționează după cum urmează: când forma diafragmei de modifică, se schimbă și rezistența electrică a stratului atașat diafragmei.

Schimbarea formei diafragmei (aproximativ 1 mm la 1500 bari) ca rezultat al creșterii presiunii sistemului, modifică rezistența electrică și provoacă o schimbare a tensiunii într-o punte de rezistențe alimentată la 5 V. Variația de tensiune este în domeniul 0 ... 70 mV (funcție de presiunea aplicată) și este amplificată de circuitul de evaluare la 0,5 ... 4,5 V.



Măsurarea cu precizie a presiunii din rampă este esențială pentru corecta funcționare a sistemului. Aceasta este una din rațiunile pentru care măsurarea presiunii aplicate sensorului de presiune din rampă se face cu o acuratețe de aproximativ  $\pm 2\%$  din diapazon.

Dacă sensorul de presiune se defectează, valva de control al presiunii este declanșată în mod "orb" folosind o funcție de urgență (*limp-home*) și valori fixe.

Figura 13.40

## ***Supapa limitator de presiune***

***Destinație.*** Supapa limitator de presiune are aceeași funcție ca și o supapă de suprapresiune. În cazul unei presiuni excesive, supapa limitator de presiune limitează presiunea din rampă prin deschiderea unei canalizații de scăpare. Supapa permite o presiune maximă în rampă de scurtă durată, de exemplu, de 1500 bari.

***Proiectare și construcție.*** Supapa limitator de presiune (figura 13.41) este un dispozitiv mecanic ce cuprinde următoarele componente:

- corp cu filet exterior pentru înfiletare în rampă;
- conexiune la conducta de retur spre rezervor;
- piston mobil;
- arc.



În capătul de conectare la rampă, corpul este prevăzut cu o trecere ce este închisă cu capătul în formă de con al pistonului apăsat în scaunul de etanșare din interiorul corpului. La presiuni de funcționare normale (până la 1350 bari), pistonul este apăsat de un arc pe scaun și rampa rămâne închisă.

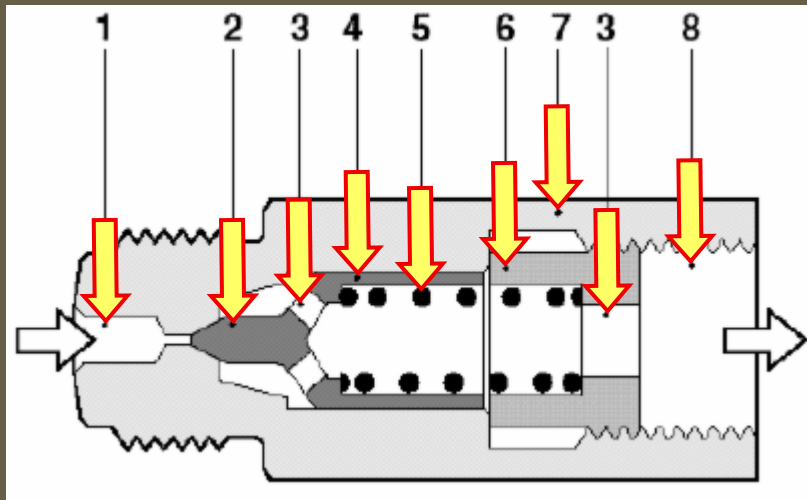
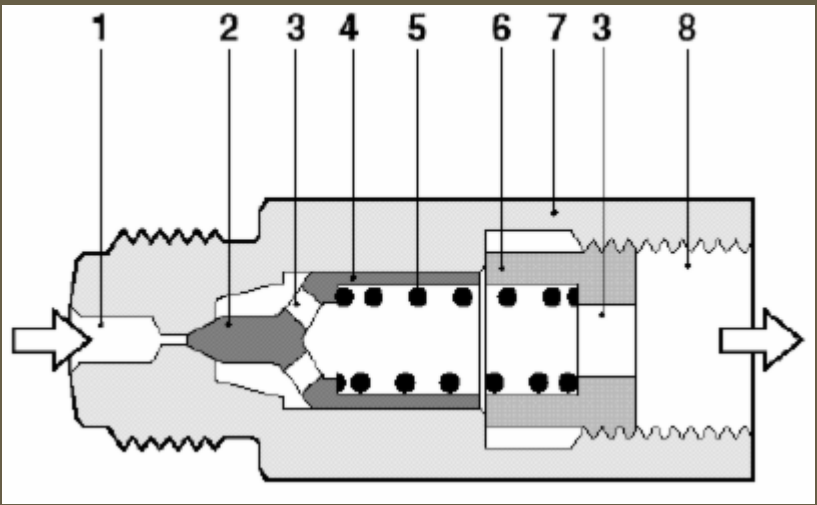


Figura 13.41

- 1 – racord de înaltă presiune;
- 2 – supapă;
- 3 – pasaje de curgere;
- 4 – piston plonjor;
- 5 – arc;
- 6 – opritor;
- 7 – corp supapă;
- 8 – retur motorină.

De îndată ce presiunea maximă din sistem este depășită, pistonul este ridicat de presiunea din rampă ce învinge forța arcului. Motorina sub presiune poate scăpa, curgând prin trecerile din interiorul pistonului, de unde este dirijată înapoi în rezervor printr-o conductă colectoare.



Când supapa se deschide motorina iese din rampă, astfel încât presiunea din rampă este limitată.

Figura 13.41

## ***Limitatorul de debit***

***Destinație.*** Limitatorul de debit previne injecția continuă în eventualitatea, foarte puțin probabilă, în care un injector ar rămâne deschis permanent. Pentru a realiza această funcție, limitatorul de debit închide conducta injectorului în discuție de îndată ce cantitatea de motorină ce iese din rampă depășește un nivel bine definit.

***Proiectare și construcție.*** Limitatorul de debit cuprinde un corp metalic cu filet exterior pentru înfiletare în rampă (înaltă presiune) și un filet exterior pentru înfiletare în conductele injectoarelor. Corpul are câte o trecere la fiecare capăt care asigură conectare hidraulică la rampă și la conducta injectorului. În interiorul corpului limitatorului de debit se găsește un piston ce este apăsat de un arc în direcția acumulatorului de motorină (common-rail).





## *Regulatorul de presiune*

Regulatorul de presiune este în esență o supapă electromagnetice. El reglează presiunea din rampă în funcție de curentul primit ce este livrat de unitatea electronică de control. Intensitatea curentului determină forța de închidere a supapei regulatorului de presiune. Excesul de motorină este returnat în rezervor.

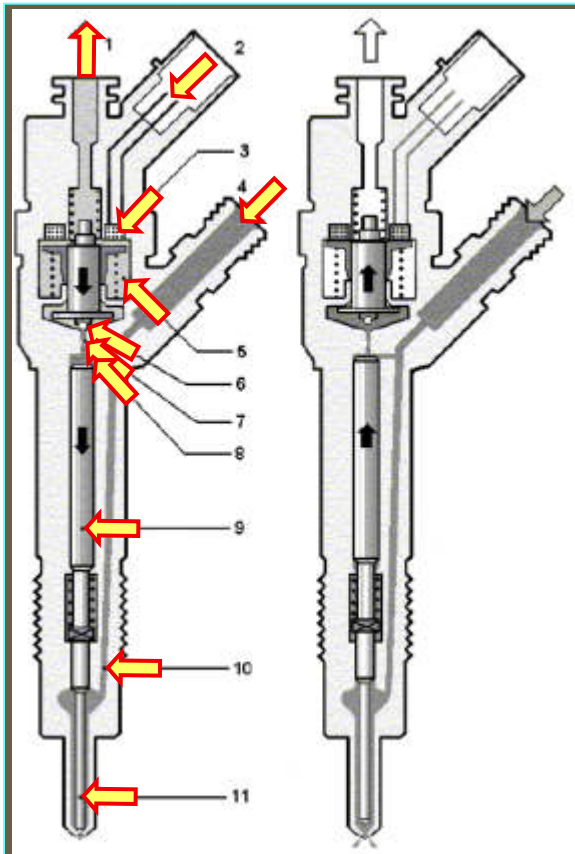


## *Injectorul*

În sistemele de injecție rampă comună se folosesc două tipuri de injectoare: electromagnetice și piezoelectrice.

În figura 13.42 se prezintă structura injectorului electromagnetic, iar în figura 13.43 un detaliu privind montarea injectorului.





- 1 – retur;
- 2 – conector electric;
- 3 – bobină electromagnet;
- 4 – racord alimentare cu motorină;
- 5 – supapă electromagnetă;
- 6 – bilă supapă;
- 7 – canalizație spre supapă;
- 8 – derivație de înaltă presiune;
- 9 – pistonul supapei;
- 10 – canalizație injecție;
- 11 – acul injectorului.

Figura 13.42

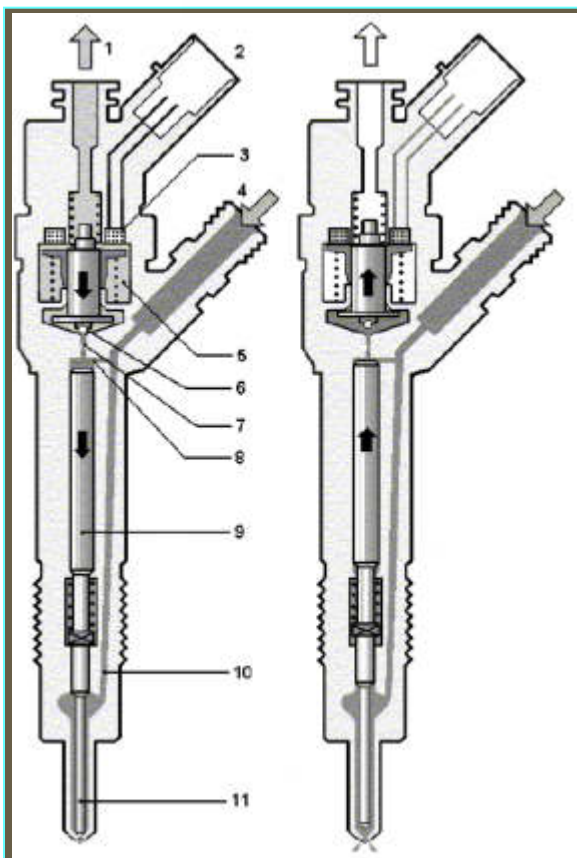


Figura 13.42

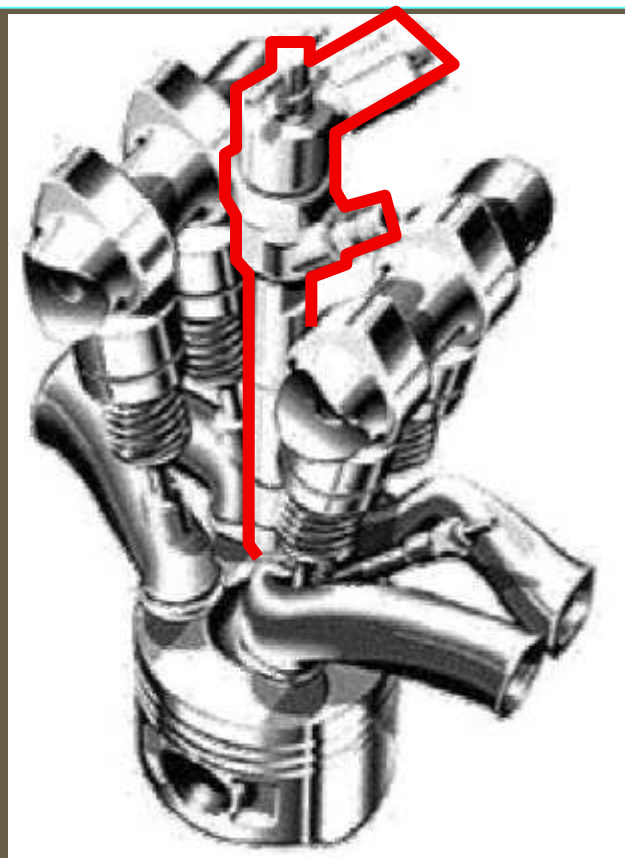


Figura 13.43

Folosirea acționării piezoelectrice în noile sisteme Diesel common-rail are drept rezultat motoare mai puțin zgomotoase și mai puțin poluante. Producția lor de serie a fost lansată de firma Siemens în 11 septembrie 2001.





În general, o înaltă presiune mai mare produce o pulverizare mai fină a motorinei, care astfel arde mai bine și mai curat. Aceste ameliorări, asigurate de o valoare mai mare a înaltei presiuni, se regăsesc într-un consum mai redus și performanțe mai bune ale motorului.

În prima generație de sisteme common-rail, întreg volumul de motorină injectată este împărțit într-o injecție pilot de durată fixă și injecția principală. Dacă motorina poate fi împărțită în mai multe părți pe durata unui singur ciclu de combustie, procesul de ardere este mai armonios.



Aceasta este rațiunea pentru care au fost dezvoltate dispozitivele de acționare piezoelectrice. Cum aceste elemente de comutație funcționează mult mai rapid decât supapele electromagnetice convenționale, este posibil să se împartă volumul de motorină și în cinci (sau ulterior în mai multe) părți.

Strategiile de management ale motorului pot include două pre-injecții cu volume foarte mici de motorină, urmate de injecția principală și două post-injecții mai mici.

Pre-injecția servește în primul rând pentru a se dezvolta o presiune uniformă în camera de ardere, ceea ce reduce zgomotul din timpul arderii. Post-injecțiile sunt prevăzute pentru post-tratamentul gazelor de evacuare, permițând reducerea emisiilor poluante ale motorului.





Sistemele de acționare piezoelectrice sunt elemente de comutație folosind comportarea specifică a cristalelor piezoelectrice. Când o sarcină electrică este conectată la un astfel de cristal, rețeaua cristalină a materialului își schimbă forma în câteva fracțiuni de milisecundă și se dilată.

Numai când sarcina electrică este descărcată, materialul revine la dimensiunile sale originale. Această proprietate poate fi folosită și la construcția injectoarelor pentru injecția de motorină.

Pentru elementul activ al injectorului piezoelectric se utilizează o structură de tip multistrat, asigurându-se astfel cursă utilă mai mare.



Și alte componente ale injectorului satisfac cerințele foarte pretențioase impuse pentru injecția Diesel.

De exemplu, orificiile din duza injectorului pot avea valori reduse ale diametrului, de ordinul 0,12 mm. Toleranța admisă pentru prelucrarea acestor orificii este mai mică de 0,003 milimetri.

Se poate estima că viitorul injecției de motorină aparține acționării piezoelectrice. Sistemele common-rail de mare viteză și precizie au realizat (încă din 2001) condițiile prealabile necesare pentru îndeplinirea normei Euro 5 (aplicată din 2009).

Această soluție a fost folosită din finalul anului 2001 de automobile ale grupului PSA (Peugeot-Citroën) sub denumirea comercială HDI, cu presiuni de injecție de până la 1500 bari, modernizând varianta anterioară cu injectoare electro-magnetice.





**Foto: Delphi**

În 2008 sistemele de injecție cu rampă comună de la Delphi au evoluat semnificativ prin utilizarea injectoarelor piezoelectrice cu acționare directă DFI3. În acest sistem de injecție, care lucrează cu presiuni de până la 2000 de bari, acul injectorului este acționat direct de dispozitivul de acționare piezoelectric și nu de un sistem de control hidraulic cu supape acționate electric.

În această abordare dispăre necesitatea conductei de retur de la injector, ceea ce reprezintă o simplificare semnificativă a părții hidraulice. Un astfel de sistem de injecție Diesel are exact aceeași structură ca și cea folosită pentru injecția de benzină, diferența fiind doar presiunea sub care se găsește carburantul.

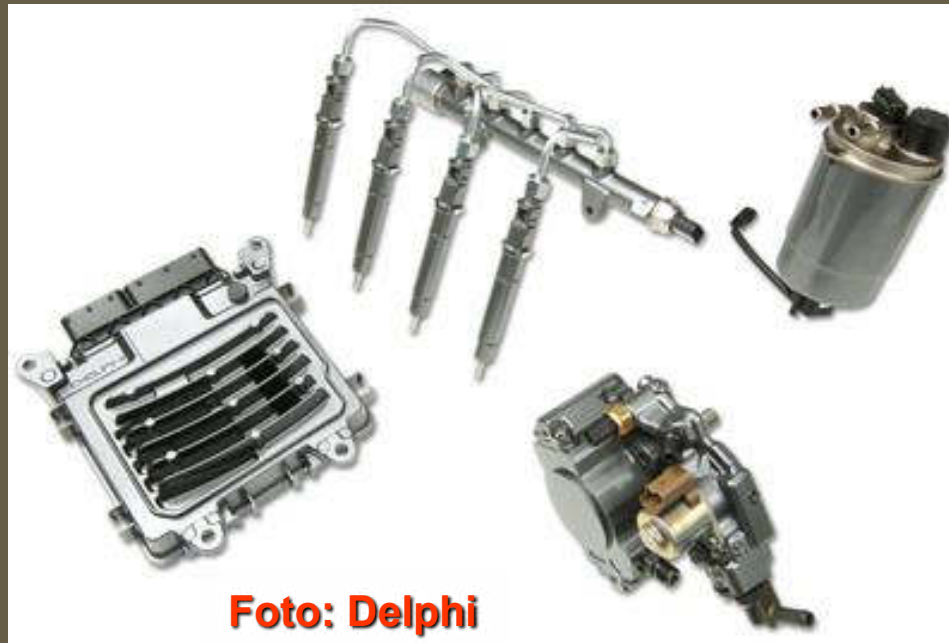


Foto: Delphi

Dispozitivul de acționare piezoelectric acționează foarte rapid asupra acului injectorului, independent de presiunea combustibilului din rampa comună. Această facilitate conduce la reducerea emisiilor poluante și a consumului de combustibil, precum și la creșterea densității de putere și a cuplului motor.

De asemenea, controlul injecțiilor multiple este optimizat deoarece nu mai apar oscilații de presiune în injector. Injectorul DFI3 este capabil să execute până la 7 injecții pe ciclu într-un timp mai scurt, comparativ cu injectoarele cu solenoid și acționare electro-hidraulică.



Injectoarele DFI3 sunt proiectate să funcționeze fără pierderi hidraulice și din acest motiv nu au conductă de retur (de joasă presiune). Astfel se economisește până la 1 kW de putere disipată, comparativ cu sistemele de injecție cu retur de combustibil.



Foto:      **Injectorul piezoelectric cu acționare directă DFI3 - secțiune**  
 Sursa:     **Delphi**

1. racord de înaltă presiune
2. conector electric
3. carcasa injectorului
4. dispozitiv de acționare piezoelectric (piezo-ceramic)
5. acul injectorului

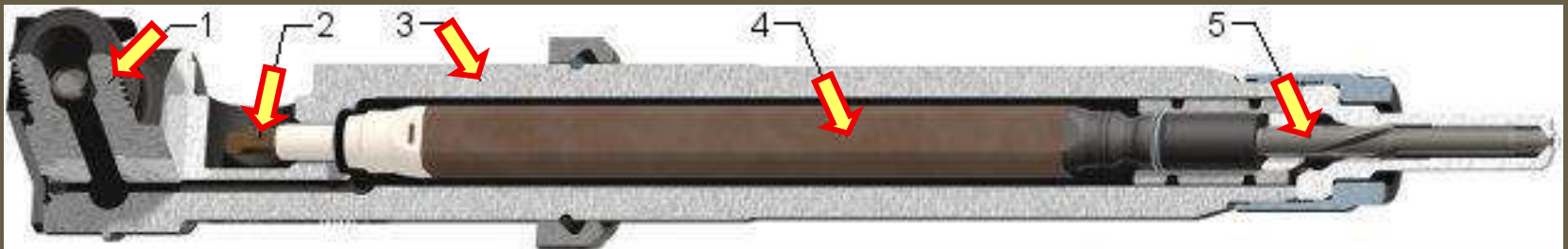
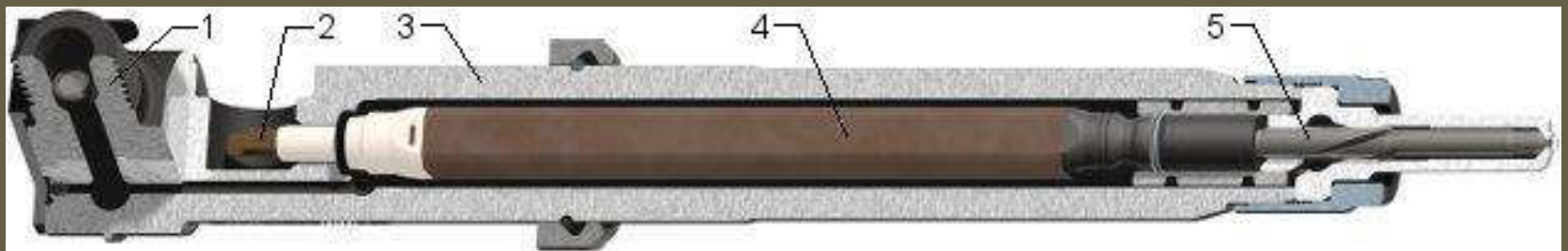


Foto: Injectorul piezoelectric cu acționare directă DFI3 – elemente componente  
 Sursa: Delphi

Acul injectorului (5) este acționat de dispozitivul de acționare piezoelectric (4) atunci când acesta este alimentat cu curent electric. Prin racordul (1) injectorul este alimentat cu combustibil de la rampa de înaltă presiune. Calculatorul de injecție comandă injectorul prin intermediul conectorului electric (2).



**Foto: Injectorul piezoelectric cu acționare directă DFI3 – elemente componente**  
**Sursa: Delphi**



1. orificii de injecție
2. canale de curgere combustibil
3. carcasa injectorului
4. dispozitiv de acționare piezoelectric
5. acul injectorului

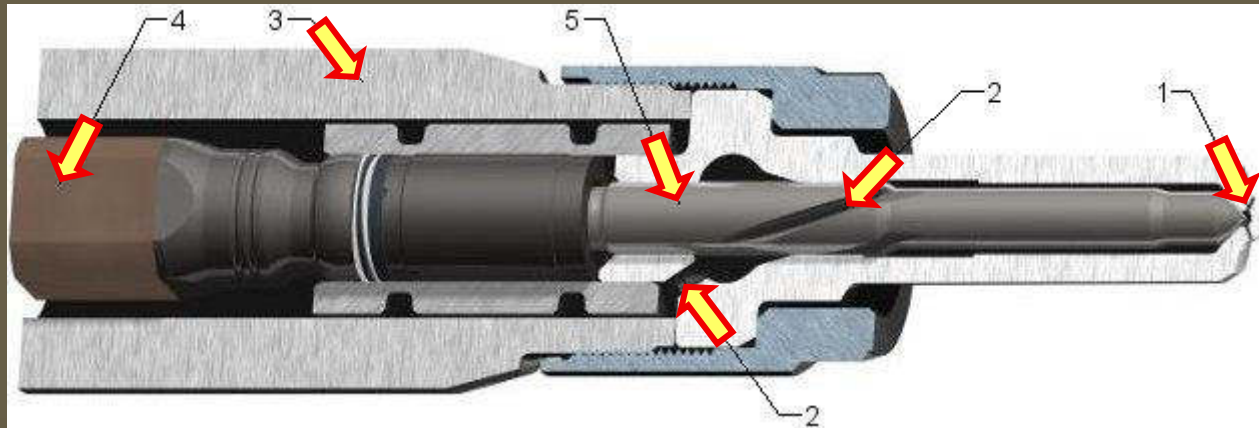


Foto: Injectorul piezoelectric cu acționare directă DFI3 – detaliu

Sursa: Delphi

Injectorul piezoelectric cu acționare directă se remarcă prin faptul că este înconjurat de combustibil, în volumul dintre carcasa (3) și dispozitivul de acționare piezoelectric (4) fiind combustibil sub presiune.

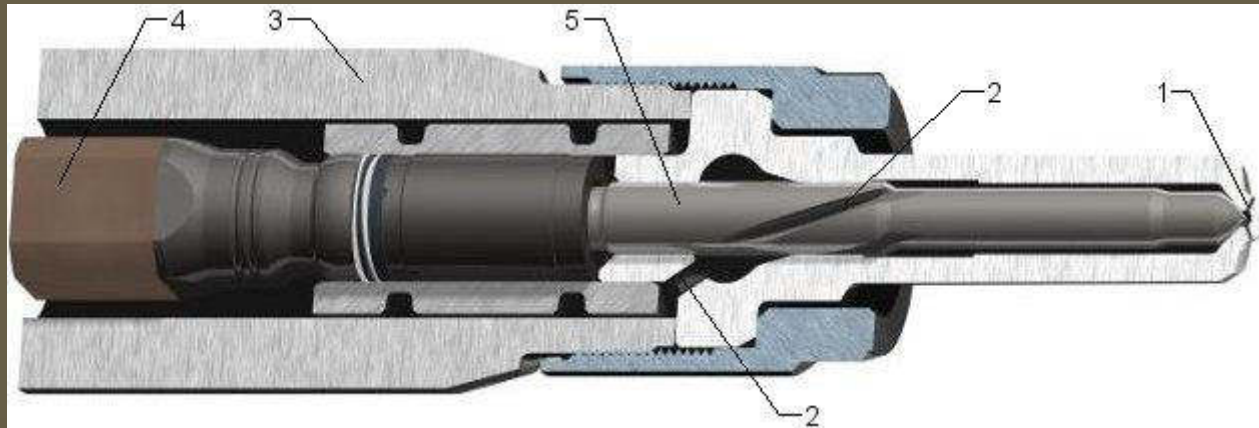
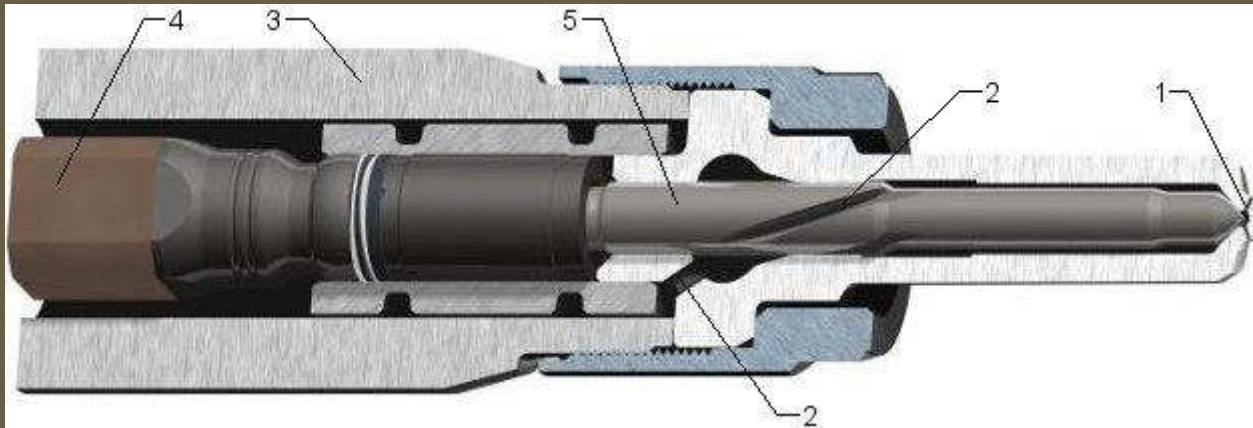


Foto: Injectorul piezoelectric cu acționare directă DFI3 – detaliu

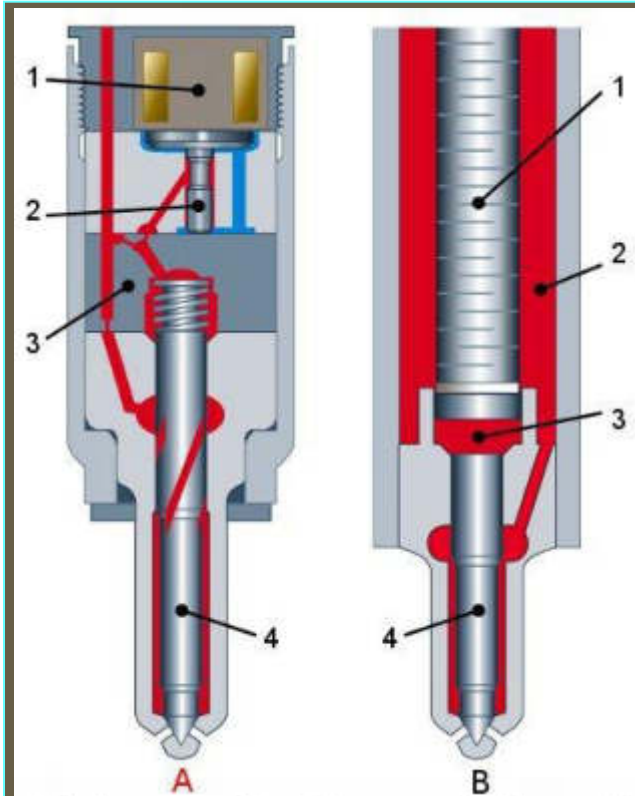
Sursa: Delphi

Prezența volumului de combustibil din injector acționează ca un acumulator de presiune, evitându-se astfel crearea de unde de presiune între injector și rampă în momentul deschiderii acului injectorului (5). Combustibilul (motorina) intră în camera acului injectorului prin canalele (2) și este injectată în cilindru prin intermediul orificiilor (1).



**Foto: Injectorul piezoelectric cu acționare directă DFI3 – detaliu**

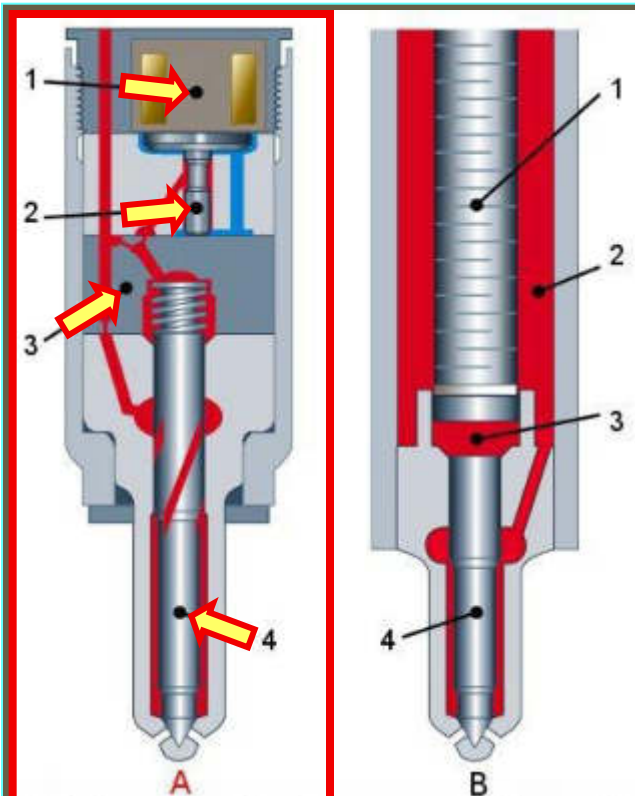
**Sursa: Delphi**



Avantajele ce se obțin prin utilizarea injectorului piezoelectric cu acționare directă în raport cu injectorul cu acționare electro-hidraulică rezultă din următoarea analiză.

Foto: Secțiune printr-un injector cu solenoid (A) și unul piezoelectric (B) – schemă de principiu

Sursa: Delphi

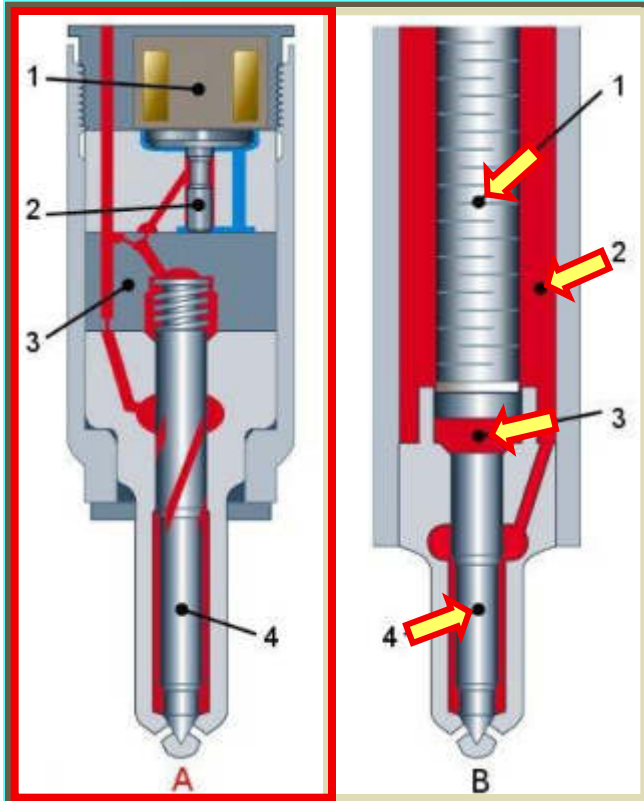


**A – injector cu acționare electro-hidraulică (solenoid).**

- 1. dispozitiv de acționare cu solenoid (electromagnet)
- 2. supapă de control
- 3. circuitul hidraulic de acționare
- 4. acul injectorului

Foto: Secțiune printr-un injector cu solenoid (A) și unul piezoelectric (B) – schemă de principiu

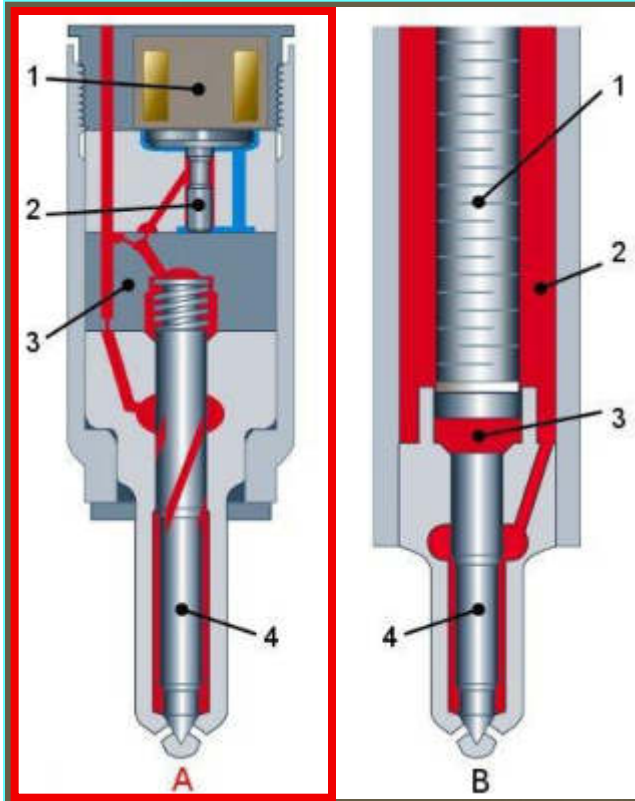
Sursa: Delphi



B – injector piezoelectric cu acționare directă.

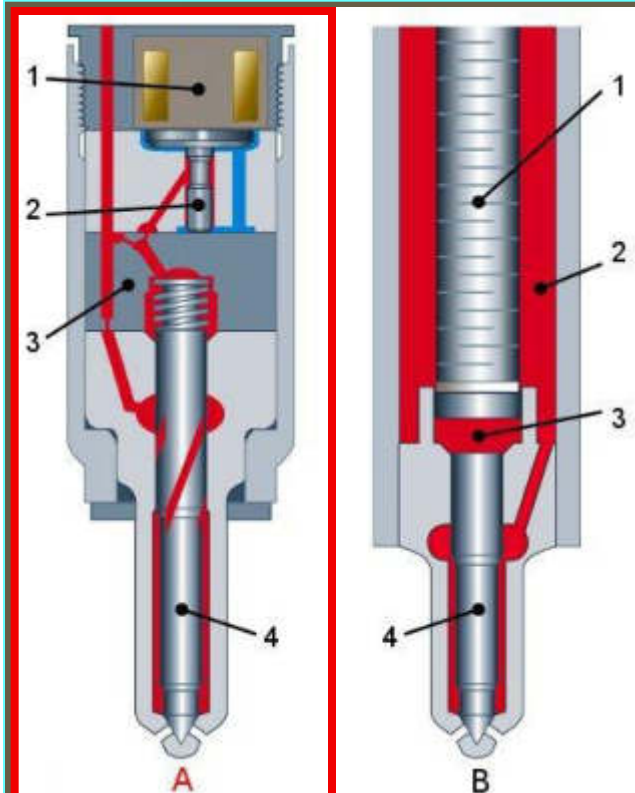
- 1. dispozitiv de acționare piezoelectric
- 2. rezervor (volum) de combustibil
- 3. amplificator hidraulic de mișcare
- 4. acul injectorului

Foto: Secțiune printr-un injector cu solenoid (A) și unul piezoelectric (B) – schemă de principiu  
Sursa: Delphi



În cazul injectorului cu acționare electro-hidraulică (A) acul injectorului (A.4) nu este acționat direct de dispozitivul de acționare cu solenoid (A.1), ci se deschide ca urmare a diferențelor de presiune ce se formează în circuitul hidraulic (A.3).

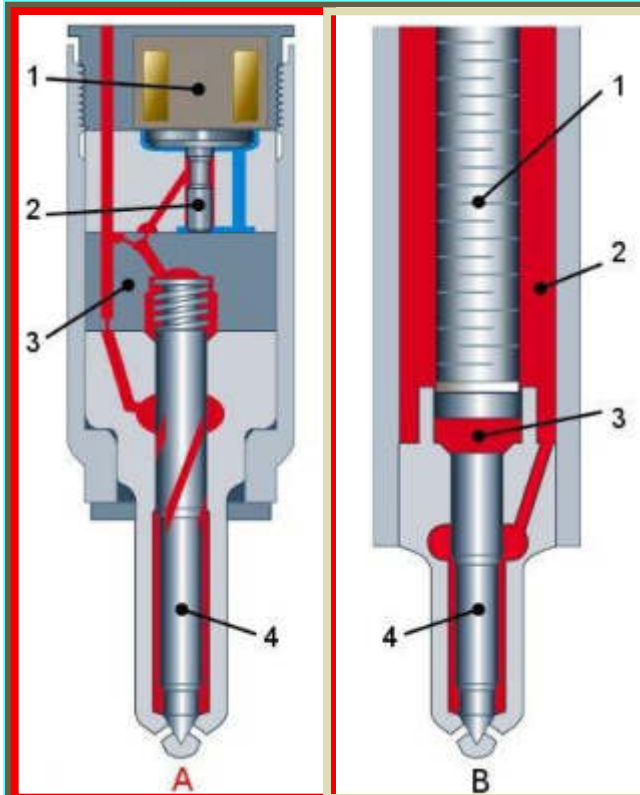
Foto: Secțiune printr-un injector cu solenoid (A) și unul piezoelectric (B) – schemă de principiu  
Sursa: Delphi



Modificarea presiunilor se datorează deschiderii supapei de control (A.2). Astfel, comanda electrică a calculatorului de injecție alimentează dispozitivul de acționare cu solenoid care deschide supapa de control, se modifică presiunile din circuitul hidraulic de comandă și implicit se deschide acul injectorului.

Foto: Secțiune printr-un injector cu solenoid (A) și unul piezoelectric (B) – schemă de principiu  
Sursa: Delphi

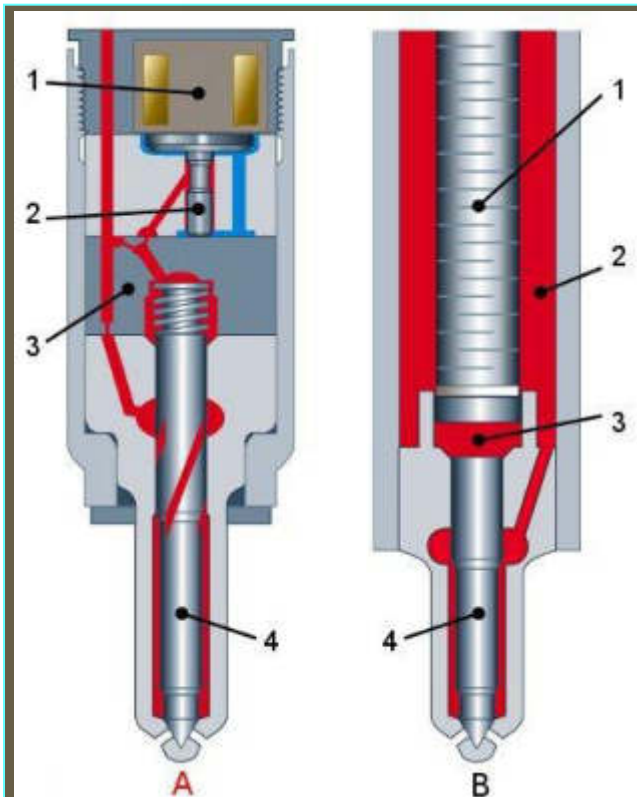




Injectorul piezoelectric cu acționare directă are avantajul că acul injectorului (B.4) este acționat direct de dispozitivul de acționare piezoelectric (B.1). Între acul injectorului și dispozitivul de acționare nu este legătură mecanică directă, mișcarea fiind transmisă și amplificată hidraulic (B.3). Deoarece combustibilul este incompresibil (compresibil în mică măsură) și el se află în injector la presiune înaltă, la alimentarea cu energie electrică a dispozitivului de acționare piezoelectric, mișcare este transmisă instantaneu acului injectorului.

**Foto:** Secțiune printr-un injector cu solenoid (A) și unul piezoelectric (B) – schemă de principiu

**Sursa:** Delphi



Datorită deschiderii foarte rapide a acului injectorului, în cazul injectorului piezoelectric, se pot efectua până la 7-8 injecții pe ciclu fără timpi de așteptare între ele. Comparativ cu un injector cu solenoid deschiderea și închiderea unui injector piezoelectric este de aproximativ 3 ori mai rapidă.

Foto: Secțiune printr-un injector cu solenoid (A) și unul piezoelectric (B) – schemă de principiu

Sursa: Delphi

Această caracteristică poate fi observată într-un studiu comparativ al imaginilor cu evoluția unei injecții pentru cele două soluții tehnologice.

**Injector acționat electro-hidraulic**

**Injector piezoelectric cu acționare directă**



Pentru sistemele de injecție cu injectoare piezoelectrice cu acționare directă Delphi se utilizează o pompă de injecție de înaltă presiune care poate ridica presiunea combustibilului până la 2000 de bari. Pompa, antrenată de motorul cu ardere internă, are două pistoane și poate funcționa până la o turație de 5000 rot/min.

**Foto:** Sistemul de injecție cu rampă comună și injectoare piezoelectrice cu acționare directă

**Sursa:** Delphi

Avantajele acestui sistem de injecție, comparativ cu injectoarele electro-hidraulice, sunt remarcabile:

- reducerea emisiilor de oxizi de azot și particule cu aproximativ 30%, creșterea cuplului și a puterii motorului cu aproximativ 10%, datorita îmbunătățirii pulverizării combustibilului injectat și a controlului mai precis a cantității de combustibil injectat;
- creșterea randamentului motorului datorită lipsei pierderilor hidraulice ale injectoarelor (lipsa returului);
- injecții multiple (7-8) și rapide;
- timpul de deschidere și închidere al injectoarelor este independent de presiunea din rampa comună de înaltă presiune.



Datorită acestor caracteristici motoarele cu 4 cilindri echipate cu sisteme de injecție cu injectoare piezoelectrice cu acționare directă și sistem de supraalimentare cu turbocompresor în două etaje pot obține performanțe similare cu cele ale unui motor în 6 cilindri.

De asemenea acest sistem de injecție facilitează atingerea nivelului Euro 6 (începând cu septembrie 2014) pentru emisii poluante.



## ***Unitatea electronică de control***

Tehnologia common-rail se bazează pentru cartografiere pe controlul timpului de injecție. Unitatea electronică de control folosește semnalele de intrare preluate cu ajutorul sensorilor și, funcție de multiplele informații primite, generează semnale de ieșire condiționate de criteriile de funcționare ale motorului.

Pentru a adapta cantitatea de motorină, unitatea electronică de control acționează fie asupra presiunii din rampă, fie asupra duratei de acționare a electroventilelor injectoarelor, sincronizând cu acuratețe aceste acțiuni.

Cantitatea de motorină injectată depinde de comanda electroventilelor, de viteza de deschidere și de închidere a acului injectorului, de presiunea carburantului în rampă, de cantitatea trecută prin injector și de ridicarea acului.



Unitatea electronică de control folosește semnale privind:

- înalta presiune din rampă;
- turația;
- presiunea din galeria de admisie;
- temperatura lichidului de răcire;
- poziția pedalei de frână;
- nivelul uleiului;
- poziția unghiulară a arborelui cotit;
- poziția pedalei de accelerație;
- debitul masic de aer (sensor cu peliculă încălzită);
- temperatura aerului.

De asemenea se schimbă informații și cu alte sisteme de control ale automobilului: ABS, antifurt, climatizare, tracțiune, etc. De exemplu, sistemul de control al tracțiunii are nevoie de anumite informații transmise de calculatorul ce controlează injecția common-rail.





## CONTROLUL NOXELOR DIN GAZELE DE EVACUARE

În tabelul următor se prezintă substanțele ce rezultă prin arderea motorinei în motorul Diesel:

| Componente ale gazelor de evacuare |                     | la mers în gol | la sarcină plină |
|------------------------------------|---------------------|----------------|------------------|
| oxizi de azot (NO <sub>x</sub> )   | ppm                 | 50 ... 250     | 600 ... 2500     |
| hidrocarburi                       | ppm                 | 50 ... 500     | 150 ...          |
| monoxid de carbon                  | ppm                 | 100 ... 450    | 350 ... 2000     |
| bioxid de carbon                   | % din volum         | ... 3,5        | 12 ... 16        |
| vapori de apă                      | % din volum         | 2 ... 4        | ... 11           |
| oxigen                             | % din volum         | 18             | 2 ... 12         |
| azot și altele                     | % din volum         | diferența      | diferența        |
| fumingine                          | mg / m <sup>3</sup> | 20             | 200              |
| temperatura gazelor de evacuare    | °C                  | 100 ... 200    | 550 ... 750      |

Pe timpul arderii motorul Diesel determină apariția de CO, HC, NO<sub>x</sub> și particule de funingine, care sunt substanțe poluante.

*Particule Diesel.* În ciuda consumului redus și a poluării reduse, motorul Diesel este adesea criticat din cauza particulelor și a fumului emis. Particulele constau din sfere microscopice din carbon cu un diametru de aproximativ 0,05 μm la care aderă hidrocarburi și ulei, rezultând o structură consolidată. La suprafață aderă de asemenea apă și sulfați.

Aceste particule măsurate în curentul gazelor de evacuare prezintă un diametru de aproximativ 0,09 μm. Această valoare este independentă de tehnologia de realizare a motorului și condițiile de funcționare, care afectează numai numărul de particule formate. Particulele pot fi separate cu filtre folosind aglomerări de molecule având o dimensiune de la 0,1 la 1 μm.



***Formarea particulelor.*** În motorul Diesel, arderea motorinei are loc cu aprindere prin compresie a amestecului eterogen aer-motorină. Calitatea arderii depinde de modul în care se formează amestecul aer-motorină.

Motorul Diesel funcționează în principiu cu aceeași cantitate de aer; puterea ce se dorește a fi obținută este controlată prin intermediul cantității de motorină injectată.

În anumite condiții de funcționare (în particular la accelerare) amestecul din camera de ardere se îmbogățește într-o anumită măsură. Astfel arderea rămâne incompletă din cauza oxigenului insuficient, ceea ce are drept efect formarea de particule.



Gazele de evacuare Diesel conțin hidrocarburi aromatice policiclice, considerate a avea efect cancerigen. Funinginea este încă prezentă în mod natural, chiar dacă se observă mai puțin.

Aceasta se explică prin normele legislative privind poluarea cu gaze de evacuare ce sunt din ce în ce mai stricte. Astfel, după 1.1.2000 (norma euro 3) nu au mai fost permise particule decât într-o cantitate de 0,05 g/km. Pentru CO se impunea valoarea de 0,64 g/km, pentru NO<sub>x</sub> 0,5g/km, iar (HC + NO<sub>x</sub>) limita era până la 0,56 g/km.

În tabelul următor se prezintă comparativ prevederile diferitelor norme (euro) privind noxele din gazele de evacuare Diesel. În tabel s-a notat cu DI = injecția directă. Valorile sunt precizate în g/km.

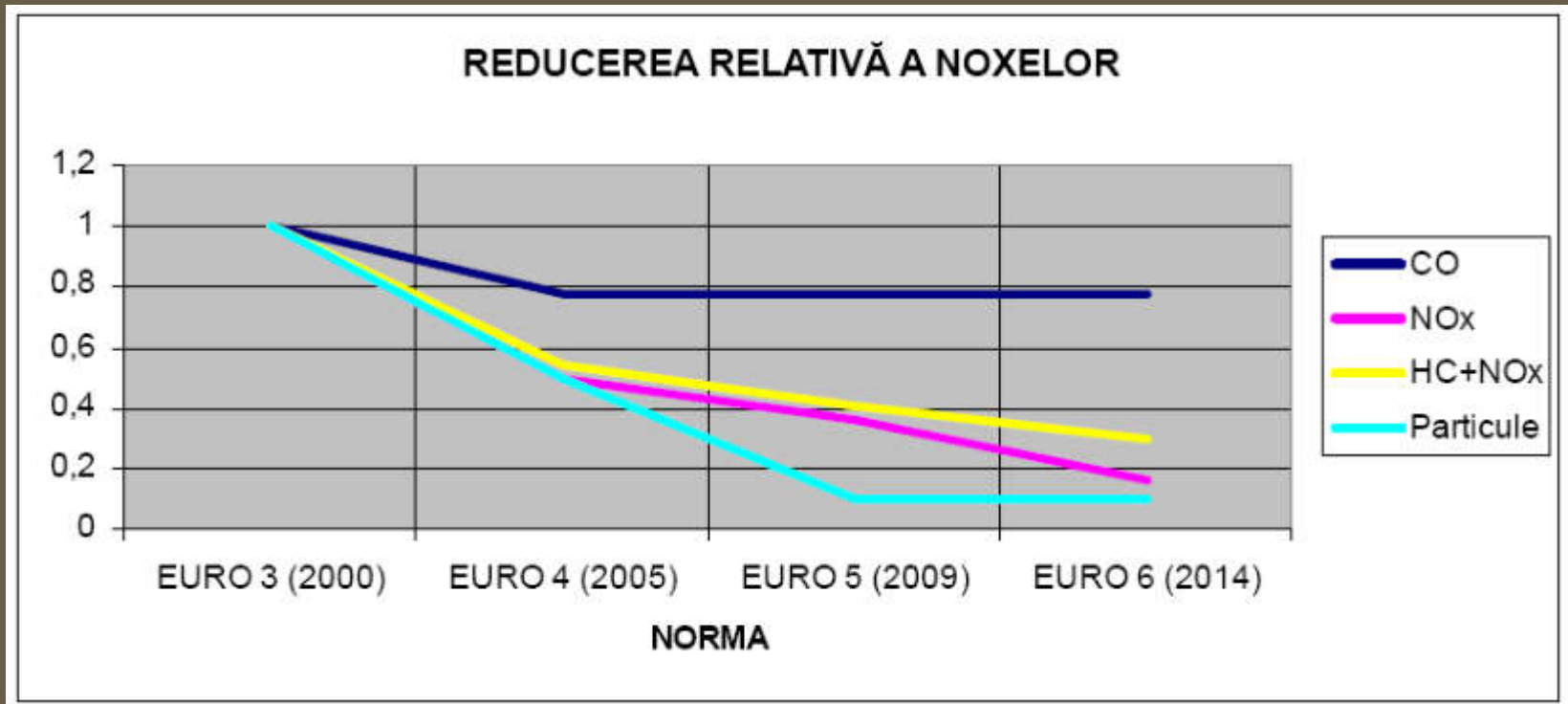


**Universitatea Tehnică a Moldovei**  
**Facultatea Calculatoare, Informatică și Microelectronică**  
**Departamentul Microelectronică și Inginerie Biomedicală**

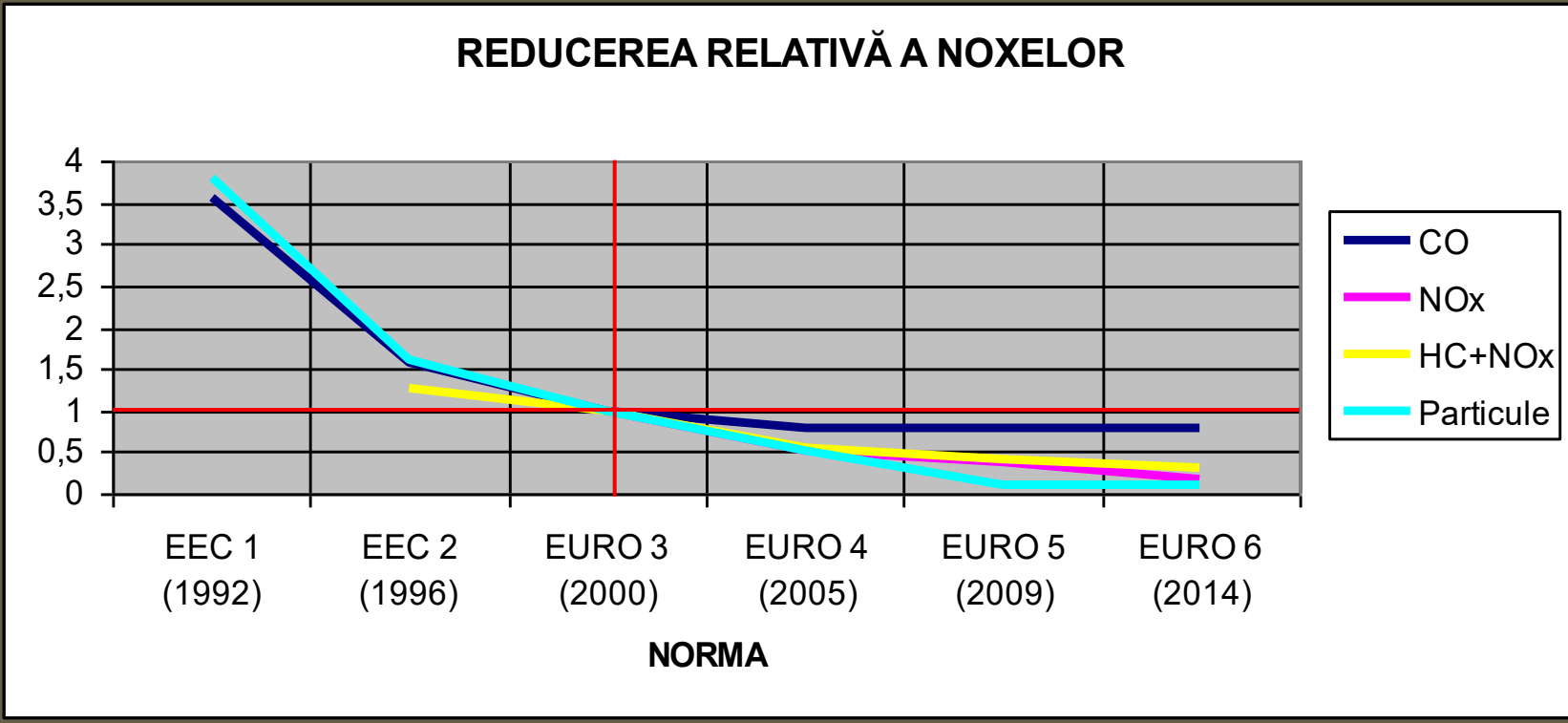
|           | EEC etapa 1<br>(după 1992) | EEC etapa 2<br>(după 1996) | Euro 3<br>(după 2000) | Euro 4<br>(din 2005) | Euro 5<br>(din 09.2009) | Euro 6<br>(din 09.2014) |
|-----------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|
| CO        | 2,27                       | 1,0                        | 0,64                  | 0,5                  | 0,5                     | 0,5                     |
| NOx       |                            |                            | 0,5                   | 0,25                 | 0,180                   | 0,080                   |
| HC + NOx  |                            | 0,7 (0,9 DI)               | 0,56                  | 0,3                  | 0,230                   | 0,170                   |
| Particule | 0,19                       | 0,08 (0,1 DI)              | 0,05                  | 0,025                | 0,005                   | 0,005                   |



Reducerea relativă a nivelului noxelor (raportată la norma EURO 3 – anul 2000) pentru perioada 2000 – 2014 se prezintă astfel:



Evoluția relativă a nivelului noxelor (raportată la norma EURO 3 – anul 2000) pentru perioada 1992 – 2014 se prezintă astfel:



## ***Poluanții din gazele de evacuare Diesel***

Componentele poluante din gazele de evacuare, problemele și modul de rezolvare sunt prezentate în cele ce urmează.

***CO și (HC + NO<sub>x</sub>)***. De la norma euro 2, până la norma euro 4, a trebuit să se realizeze o reducere de 10% pentru HC + NO<sub>x</sub>, iar la CO reducerea este de 50%. Pentru îndeplinirea acestor cerințe, s-au avut în vedere următoarele mijloace:

- oxidarea catalitică, ce scade nivelul pentru CO și HC, dar nu și pentru NO<sub>x</sub> (care trebuie supus unei reacții chimice de reducere);
- control electronic pentru a se reduce temperatura din camera de ardere și astfel emisia de NO<sub>x</sub>;
- folosirea injecției pilot, care printre altele scade nivelul de NO<sub>x</sub> și asigură un mers mai calm al motorului;





- presiuni de injecție înalte, ce reduc nivelul noxelor în gazele de evacuare;
- catalizator din zeolit (silicat natural complex din anumite roci vulcanice) împotriva  $\text{NO}_x$ ;
- tehnologie cu patru supape pe cilindru, cu injector plasat central, împreună cu o formă corespunzătoare a degajării din capul pistonului ce îmbunătățește formarea amestecului aer-motorină, asigurându-se o ardere mai bună și astfel un nivel mai scăzut al noxelor.

*Particulele de funingine.* Acestea apar din cauza arderii incomplete. Hidrocarburile aromatice policiclice sunt considerate cancerigene. Reducerea impusă de norma euro 4 (2005) față de euro 2 este de circa 40%. Filtrele de particule asigură o reducere cvasi-completă.



**Fumul de accelerație.** Se poate reduce folosind turbină cu geometrie variabilă pentru compresorul de supraalimentare sau compresor mecanic auxiliar și răcirea aerului admis (intercooler).

**Sulf.** În prezent concentrația de sulf în gazele de evacuare este de 350 ppm. Sulful formează depuneri în catalizatorul cu acumulare de NO<sub>x</sub>, impunând o ardere liberă. Diminuarea cantității de sulf asigură o funcționare mai eficientă a filtrului de particule cu regenerare și a catalizatorului de oxidare. Ca urmare, de exemplu Volkswagen impune o valoare de 10 ppm pentru sulf. Rezultă deci necesitatea reducerii cantității de sulf din motorină.



## *Influența construcției motorului Diesel asupra nivelului noxelor*

**Camera de ardere.** Nivelul emisiilor de evacuare este afectat de construcția camerei de ardere.

Motoarele ce folosesc cameră de ardere divizată (antecameră, cameră cu turbulență) produc nivele mai reduse de oxizi de azot decât motoarele cu injecție directă. Pe de altă parte, motoarele cu injecție directă asigură un consum de motorină mai mic.

Forma turbulenței aerului din camera de ardere și forma în care se descarcă motorina pot fi adaptate pentru o compatibilitate reciprocă maximă, având drept rezultat un amestec aer-benzină mai eterogen și o ardere mai completă. Temperatura de ardere trebuie să fie suficient de ridicată pentru a asigura o aprindere sigură.



***Injecția de motorină.*** Sincronizarea și secvențele injecției, precum și pulverizarea motorinei au efect asupra nivelului emisiilor poluate. Punctul la care începe arderea este una din funcțiile esențiale ale sincronizării injecției.

Întârzierea injecției conduce la reducerea nivelului de poluare cu  $\text{NO}_x$ , iar o întârziere excesivă are drept rezultat un nivel mai înalt al hidrocarburilor în gazele de evacuare. O deviație de  $1^\circ$  (rotire arbore cotit) a momentului de începere a injecției poate duce la creșterea emisiilor de  $\text{NO}_x$  cu până la 5%, în timp ce emisiile de HC cresc cu până la 15%.

Acest înalt nivel de sensibilitate arată importanța preciziei de reglare a sincronizării injecției. Sistemele electronice de control sunt capabile să mențină o sincronizare optimă cu un înalt grad de precizie.



Cu un astfel de sistem electronic de control (EDC), elementul care stă la baza controlului poziționării dispozitivului de sincronizare este un punct de referință al arborelui cotit.

O precizie extrem de ridicată se poate obține prin monitorizarea directă a momentului de începere a injecției la nivelul duzei prin intermediul unui sensor de mișcare a acului (controlul momentului de începere a injecției).

Orice cantitate de motorină ce intră în camera de ardere după ce procesul de ardere s-a terminat poate fi descărcată direct în sistemul de evacuare sub formă nearsă, ceea ce crește nivelul emisiilor de hidrocarburi. Pentru a preveni ca acest lucru să se întâmple, volumul de motorină rămas între scaunul duzei și capătul orificiului de descărcare este menținut la o valoare minimă. De asemenea este esențial să se evite picurarea și post-injecția.



O pulverizare fină a motorinei promovează un amestec intim între aer și motorină, ceea ce contribuie la reducerea emisiilor de funingine (particule) și de hidrocarburi. Acest tip de pulverizare fină se realizează folosind presiuni de injecție ridicate și o geometrie optimă a orficiului de descărcare.

Debitul maxim de motorină pentru o anumită cantitate de aer din admisie trebuie limitat cu scopul de a preveni ca motorul să formeze emisii sub formă de funingine. Din acest motiv este necesar un factor de exces al aerului de 10 ... 20 % ( $\lambda = 1,1 \dots 1,2$ ).



*Temperatura aerului din admisie.* O temperatură mai mare a aerului din admisie este însoțită de temperaturi de ardere mai mari, cu o creștere observabilă a emisiilor de  $\text{NO}_x$ . La motoarele supraalimentate cu turbocompresor, răcirea aerului din admisie (cu intercooler) reprezintă un mijloc eficient de inhibare a formării de  $\text{NO}_x$ .



***Recircularea gazelor de evacuare (EGR).*** O anumită cantitate din gazele de evacuare poate fi readusă în aerul de admisie pentru a reduce cantitatea de oxigen din încărcătura proaspătă, ceea ce crește și căldura specifică. În acest mod se produc temperaturi de ardere mai reduse (ceea ce limitează producerea  $\text{NO}_x$ ) și se reduc emisiile de evacuare.

O recirculare excesivă a gazelor de evacuare duce la emisii mai ridicate de funingine, monoxid de carbon și hidrocarburi, din cauza insuficienței oxigenului. Ca urmare, cantitatea de gaze recirculate trebuie limitată pentru a fi siguri că în camera de ardere ajunge suficient oxigen pentru a asigura arderea motorinei injectate.





## *Posibilități de reducere a emisiilor motorului Diesel*

În cele ce urmează sunt prezentate principalele căi de reducere a nivelului de noxe emise de motorul Diesel. O atenție deosebită este acordată problemei poluării cu particule, principala critică adusă motorului Diesel, alături de funcționarea zgomotoasă.

*Procesul de ardere.* Camera de ardere pentru un sistem cu injecție directă este proiectată într-o manieră care să îmbunătățească eficiența aerodinamică și termodinamică. Dacă turbulența aerului este insuficient modelată prin construcție, poate rezulta un amestec omogen care favorizează formarea de particule.



***Carburantul.*** Calitatea carburantului joacă un rol crucial în emisia de particule. Creșterea cetonelor și reducerea fracțiunilor poliaromatice limitează numărul de particule format. Un conținut mai redus de sulf scade și nivelul poluării cu sulf.

***Oxidarea catalitică.*** Tratamentul care urmează prin oxidare catalitică provoacă o reducere a particulelor din hidrocarburi.

***Filtrele de particule.*** Pentru a elimina numai particulele din gazele de evacuare se folosesc filtre speciale.

***Procesele de reducere.*** Reacția chimică de reducere, folosită pentru diminuarea proporției de  $\text{NO}_x$  din gazele de evacuare, se poate realiza în mai multe variante:



- Catalizatorul cu acumulare de NO<sub>x</sub>. Oxizii de azot se prezintă ca și cum ar fi acumulați într-un burete. Ca urmare, catalizatorul trebuie să fie curățat periodic întrucât sulful îl contaminează.
- Catalizatorul cu uree – catalizator cu reducere selectivă (SCR = selective catalytic reduction). Sistemul SCR (catalizator cu reducere selectivă) reduce NO<sub>x</sub> la N<sub>2</sub> și H<sub>2</sub>O cu o eficiență de 60%. Procedeu folosește uree. Se utilizează un catalizator ceramic în care se injectează soluție de uree în apă. Alimentarea cu uree se face separat. La contactul ureei cu gazele de evacuare de temperatură ridicată rezultă amoniac (NH<sub>3</sub>), care reacționează cu NO<sub>x</sub>. Ca aspect important, catalizatorul de acest tip funcționează eficient și cu motorină cu conținut ridicat de sulf, o cantitate de 6 kg de uree fiind suficientă pentru aproximativ 20.000 km.



- Catalizatorul cu amoniac. În cazul camioanelor, Daimler-Chrysler are în vedere o soluție alternativă la utilizarea ureei. În acest caz, pentru reducerea  $\text{NO}_x$  se folosește drept agent amoniacul. Amoniacul este stocat în rezorvoare speciale într-o cantitate de 10 kg și se folosește direct în formă gazoasă. Sistemul este încă în faza de dezvoltare, fiind impuse condiții severe de siguranță în funcționare, întrucât amoniacul este toxic.



*Filtre cu regenerare pentru funingine și sulf.* Regenerarea filtrului se bazează pe arderea particulelor. În general se realizează o ardere la anumite intervale de timp, folosind  $O_2$  la temperatura gazelor de evacuare de peste  $500^\circ C$ . Aceasta provoacă o creștere a consumului și volumului de gaze evacuate.

Sunt cunoscute mai multe tipuri de filtre, dezvoltate de diferiți producători. Astfel compania Volkswagen a dezvoltat sistemul CRT (Continuous Regeneration Trap) – separator cu regenerare continuă, în care arderea se face în mod constant în prezența  $NO_2$ , filtrul fiind încărcat numai până la 30%.

Temperatura necesară este de  $300^\circ C$ . Încălzirea se face prin post-injecție sau electric, iar controlul necesită senzori de presiune și temperatură.



Compania PSA (Peugeot, Citroën) folosește sistemul FAP (Filtre À Particules). Funcționarea se face la temperaturi peste 450°C. Se folosesc aditivi speciali (cu ceriu) pentru a reduce temperatura de descompunere a particulelor. Consumul de motorină crește cu circa 5% (din cauza utilizării post-injecției). Aditivii sunt stocați într-un rezervor auxiliar și ajung pentru 80.000 km. Filtrul nu se schimbă și se curăță la fiecare 80.000 km, atunci când se face și umplerea rezervorului suplimentar pentru aditivi. Un Diesel common-rail modern fără filtru de particule emană la 80.000 km parcurși aproximativ 3 kg de funingine, iar cu filtru FAP produce mai puțin de 100 g. În figurile 13.44, 13.45 și 13.46 se prezintă câteva configurații utilizate pentru tratamentul gazelor de evacuare la motoare Diesel.



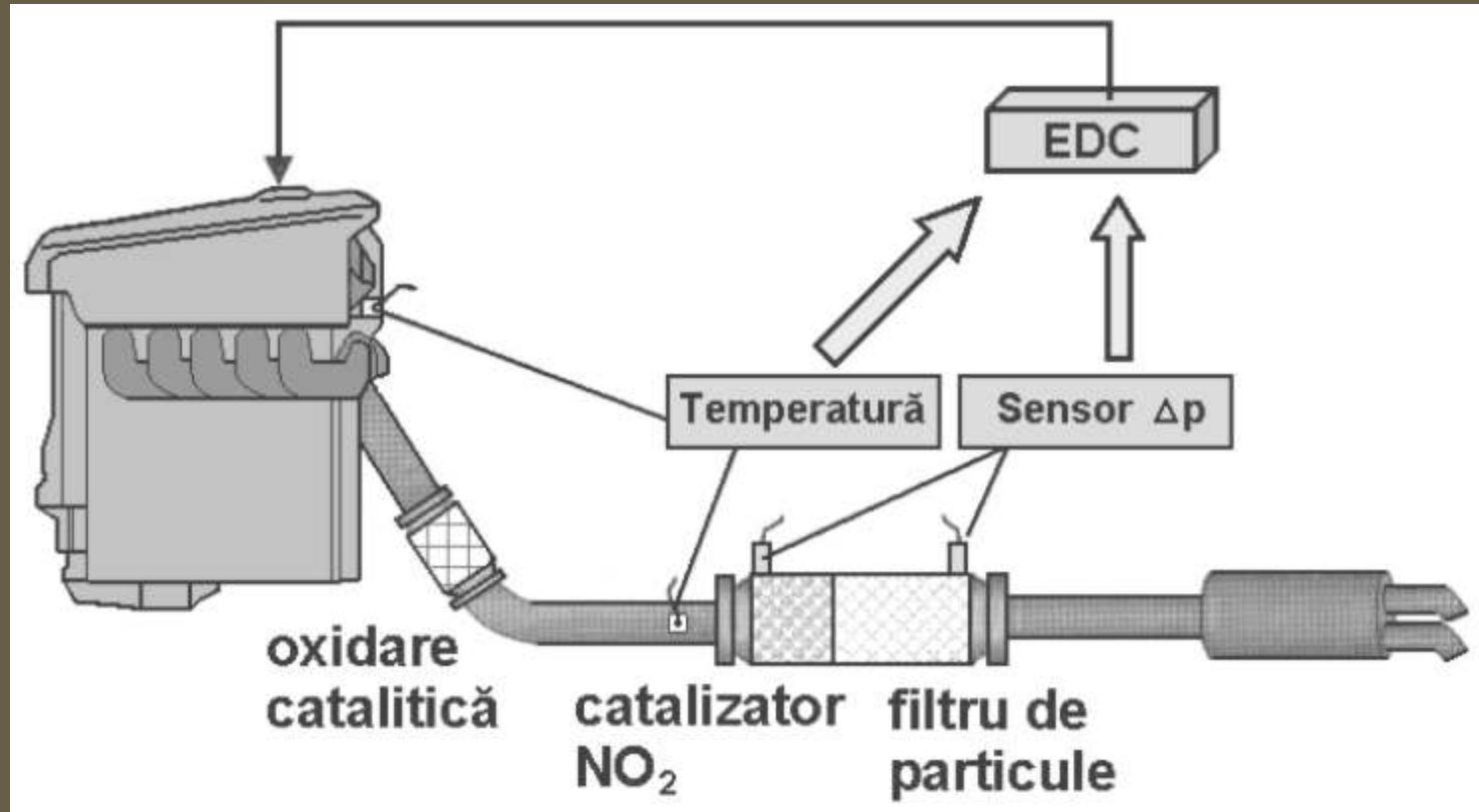


Figura 13.44

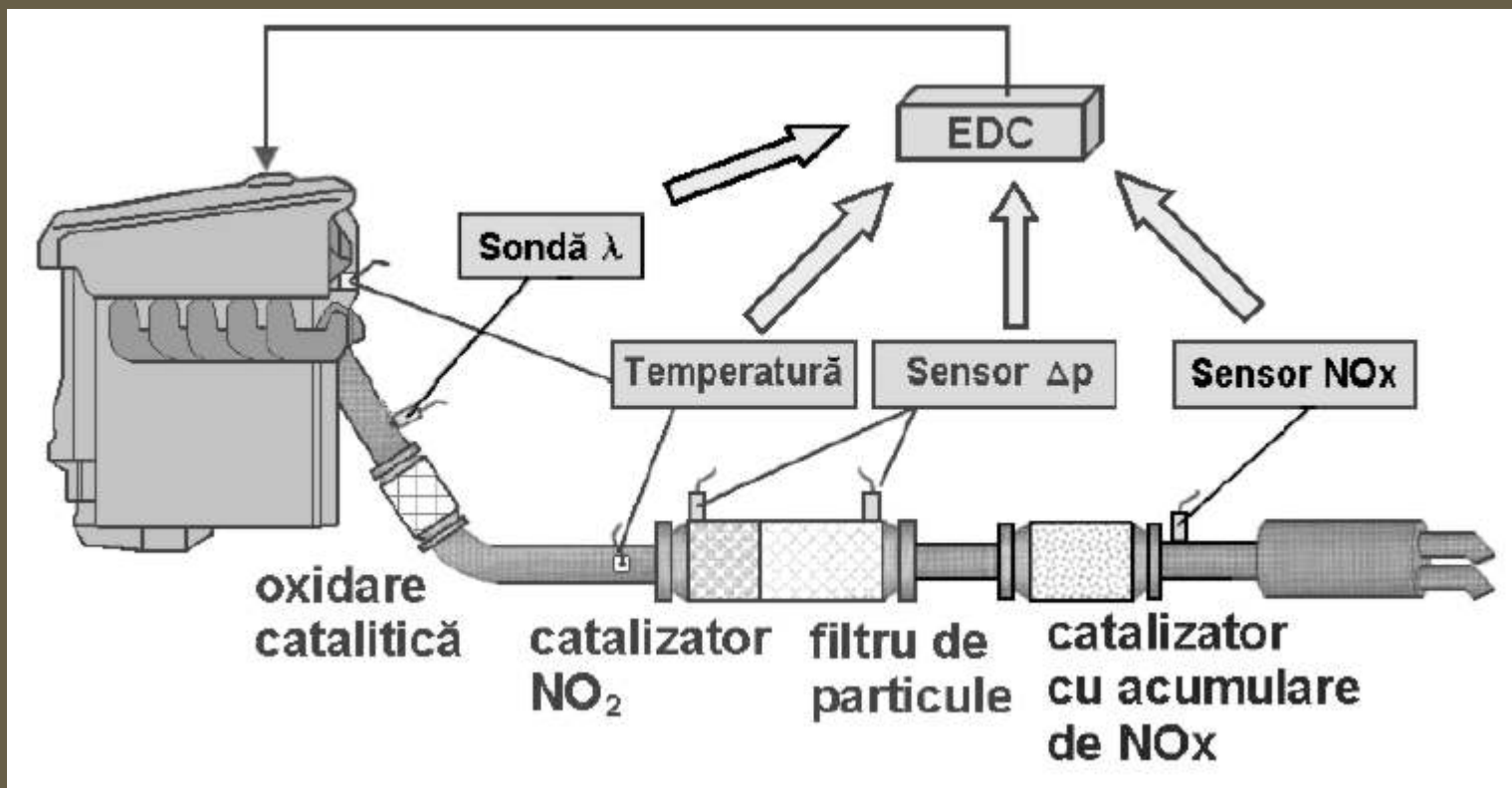


Figura 13.45



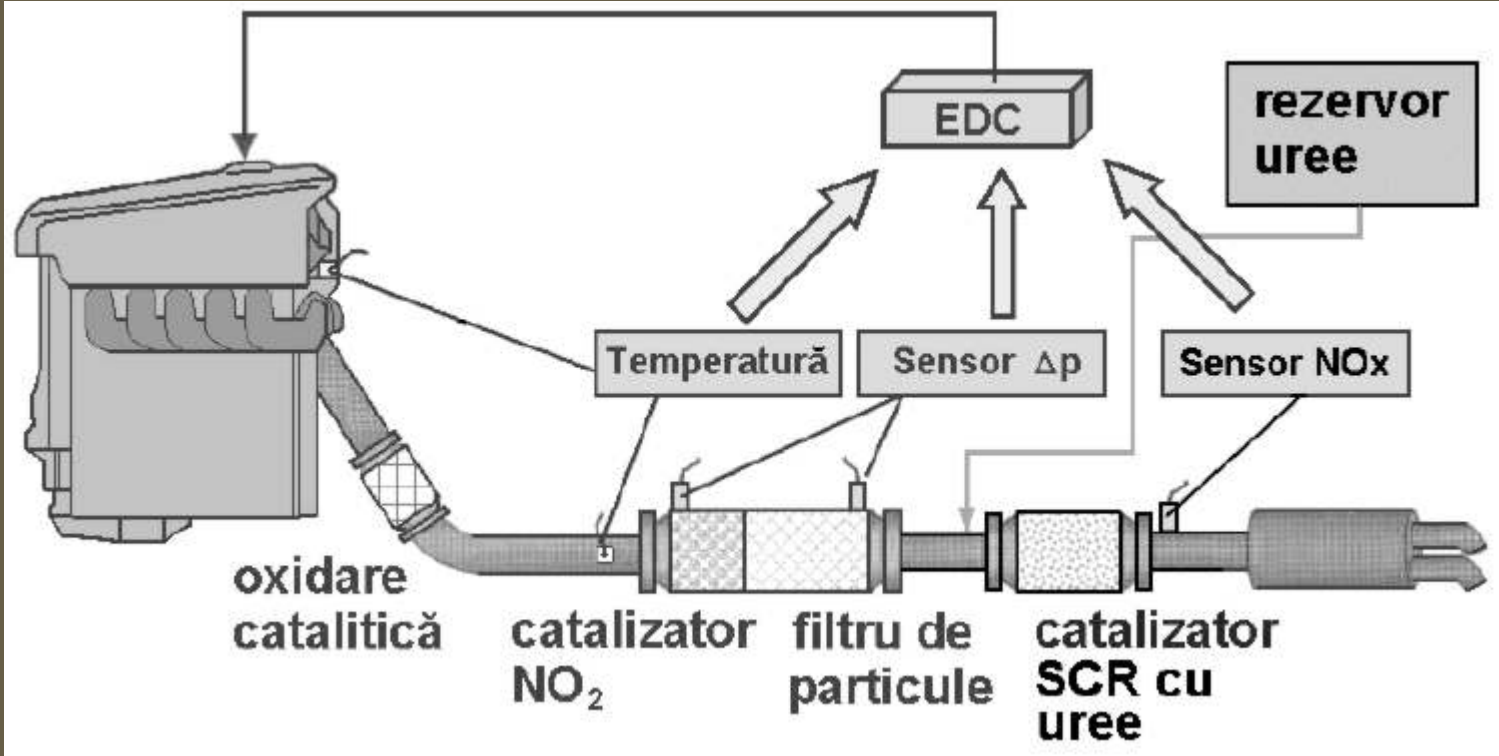


Figura 13.46

## *Recircularea gazelor de evacuare*

În această soluție se utilizează o valvă EGR (Exhaust Gas Recirculation = recircularea gazelor de evacuare), cu ajutorul căreia se introduce în curentul aerului de admisie o anumită cantitate de gaze arse din circuitul de evacuare. Funcționarea valvei poate fi controlată electronic conform unei cartograme caracteristice.

Scăderea temperaturii de ardere, ce se obține prin diminuarea concentrației de oxigen din amestecul carburant, determină o reducere a concentrației de  $\text{NO}_x$  în gazele de evacuare. CO și HC se pot diminua, după cum s-a văzut, folosind catalizatorul cu oxidare care are o construcție mult mai simplă decât catalizatoarele cu reducere.



Dacă gazele de evacuare folosite pentru amestecul cu aerul din admisie sunt în prealabil răcite, se poate obține o scădere suplimentară a concentrației oxizilor de azot.



## ***HDI– un exemplu de rezolvare a problemelor legate de noxele emise de motorul Diesel***

***Utilizarea în producție de serie a filtrului FAP. Sistemul cu filtru FAP (Filtre À Particules) a fost utilizat în premieră de grupul PSA Peugeot Citroën la începutul anului 2000, odată cu lansarea motorului cu codificarea DW12 TED4.***

**Acesta este un motor de vârf, cu capacitatea cilindrică de 2,2 litri ce dezvoltă o putere de 98 kW (133 CP) și un cuplu de 315 Nm. Performanțele sunt superioare unui motor Diesel modern de 2,5 litri.**



Cu o concepție constructivă optimizată pentru a limita emisiile poluante, acest motor este caracterizat prin:

- 4 supape pe cilindru;
- un dispozitiv "swirl" (de turbionare) variabil ce acționează asupra mișcării aerului în cilindru și în camera de ardere;
- un turbocompresor cu geometrie variabilă;
- un sistem evoluat de recirculare a gazelor de evacuare (EGR) ce include un răcitor pentru gazele recirculate (intercooler).



*Un bilanț de mediu convingător.* Sistemul FAP se înscrie într-o strategie de ansablu ce urmărește reducerea emisiilor poluante. El dă motorului HDI un avantaj ecologic determinant, completând cu eficiență performanțele sale intrinseci prin eliminarea particulelor și a fumului.

Sistemul FAP este activ, indiferent care ar fi condițiile de utilizare ale vehiculului. Regenerarea se efectuează într-o manieră neobservabilă de către conducătorul auto, în timp ce performanțele vehiculului sunt conservate.



*Utilizarea practică a sistemului FAP.* Regenerarea filtrului este controlată de logica de comandă a motorului. Un sensor de presiune urmărește starea de colmatare a filtrului și declașează, ori de câte ori este necesar, operația de regenerare.

Regenerarea se face datorită postarderilor controlate ce mențin temperatura gazelor de eșapament la  $450^{\circ} - 500^{\circ} \text{C}$  la intrarea în filtru. O regenerare completă necesită de la două la trei minute. Operațiunea se efectuează la fiecare 400 – 500 km.



***Suportul de filtrare.*** Filtrul de particule (FAP) este o structură poroasă ce conține canale organizate într-o manieră ce forțează gazele de eșapament să traverseze pereții. Realizată din carbură de siliciu, această structură se caracterizează prin:

- o eficacitate foarte mare a filtrării;
- o pierdere de sarcină redusă;
- o rezistență foarte bună la solicitările termice, mecanice și chimice;
- o mare capacitate de reținere a particulelor, ceea ce limitează frecvența regenerărilor

Acest filtru rămâne eficace pe toată durata de viață a vehiculului. La fiecare 80.000 km se efectuează o curăție cu apă sub presiune pentru a elimina depunerile de *ceriu* (substanța activă din aditiv).





**Controlul cuplului.** Utilizarea postcombustiei pe durata operațiunilor de regenerare antrenează o creștere a cuplului motorului. Pentru ca operațiunea să fie inezizabilă pentru conducătorul auto, au fost puse la punct tehnici de control speciale a cuplului. Acestea acționează prin:

- o comandă optimizată a fiecărei injecții elementare, pre-injecții, injecții principale și post-injecții;
- un control al presiunii de supraalimentare (de la turbocompresor).

Numai flexibilitatea sistemului "common-rail" permite efectuarea injecțiilor de carburant ce asigură o regenerare eficace a filtrului, păstrând în același timp o bună comportare în conducere.



***Sistemul de aditivare.*** Substanța activă, *ceriu*, este utilizată dizolvată într-o soluție organică stocată într-un rezervor suplimentar plasat lângă rezervorul de carburant.

Pentru a injecta o cantitate de aditiv proporțională cu volumul de carburant introdus cu ocazia umplerii rezervorului a fost dezvoltat un sistem special de aditivare. Acesta se compune din:

- un dispozitiv de extragere cu detectarea nivelului minim în rezervorul de aditiv;
- un sistem de injectare a aditivului în rezervorul principal de carburant;
- un computer special pentru generarea funcției de aditivare.



Pentru un plin de 60 litri, sistemul va injecta 37,5 ml de soluție ce conține 1,9 g de *ceriu*. Rezervorul de aditiv, cu o capacitate de 5 litri, asigură o autonomie de 80.000 km. Refacerea plinului cu aditiv se va face în același timp cu curățirea fitrului.



*Principiul de regenerare a filtrului de particule.* Regenerarea constă din arderea periodică a particulelor acumulate de filtru. Aceste particule sunt formate în principal din carbon și hidrocarburi. În prezența oxigenului, regenerarea filtrului prin arderea particulelor captate de filtru se face la o temperatură de 550° C.

Cele 550° C sunt foarte îndepărtate de valorile de temperaturi observabile în domeniul de utilizare a motorului HDI. Pe de o parte, progresele realizate în ceea ce privește randamentul motorului au redus energia disipată prin eșapament. Pe de altă parte, în oraș, motorul este puțin solicitat din punct de vedere termic și temperatura în eșapament variază în general de la 150° la 200° C.



Trebuia deci să se dezvolte o strategie de regenerare a filtrului FAP, care să asigure anumite caracteristici:

- să mențină ușurința și plăcerea conducerii, indiferent de condițiile de rulare;
- să fie compatibilă cu normele antipoluare în vigoare;
- să fie ușor de întreținut;
- să nu introducă constrângeri pentru utilizator.



## Sistemul filtrului de particule conține:

- un suport filtrant din carbură de siliciu asociat cu un pre-catalizator plasat în amonte;
- sensori pentru controlul temperaturii și presiunii;
- o logică de comandă și control a sistemului integrată în computerul de management al motorului "common-rail". Această logică constituie inima sistemului. Ea controlează regenerarea filtrului și asigură auto-diagnosticarea sistemului;
- un sistem de aditivare a carburantului, integrat pe vehicul, care injectează în rezervor, la fiecare plin, o cantitate corespunzătoare dintr-un aditiv pe bază de *ceriu*.



Suplețea tehnologiei "common-rail" este cea care permite utilizarea injecțiilor multiple care generează, ori de câte ori este necesar, o creștere a temperaturii gazelor de ardere cu peste 300° C.

Printr-o gestionare corespunzătoare a sistemului de injecție "common-rail", operațiunea de creștere a temperaturii se efectuează în două etape:

- o post-injecție de carburat în faza de detentă ce crează o postardere în cilindru și antrenează o creștere a temperaturii cu 200 la 250° C;
- o postardere complementară, produsă de un catalizator de oxidare plasat înaintea filtrului, ce trarează hidrocarburile nearse ce rezultă din post-injecție.

Temperatura poate astfel să mai crească suplimentar încă cu peste 100° C.



Chiar în condițiile de rulare cele mai defavorabile în care motorul nu are timp să-și crească temperatura, aceste operațiuni, odată declanșate, permit să se depășească pragul de  $450^{\circ}\text{C}$  în gazele de ardere.

*Aditivarea carburantului.* Pentru atingerea pragului de regenerare, carburantul este aditivat cu un produs denumit comercial Eolys®, un compus pe bază de *ceriu* pus la punct de societatea Rhodia, care coboară temperatura de ardere a particulelor la  $450^{\circ}\text{C}$ , cu circa  $100^{\circ}\text{C}$  mai puțin decât temperatura naturală de ardere. Numeroase teste de mediu au demonstrat că aditivul nu crează probleme de poluare.





O imagine sugestivă a principiilor folosite în motorul "common-rail" HDI cu filtru de particule (FAP) este prezentată în figura 13.47.

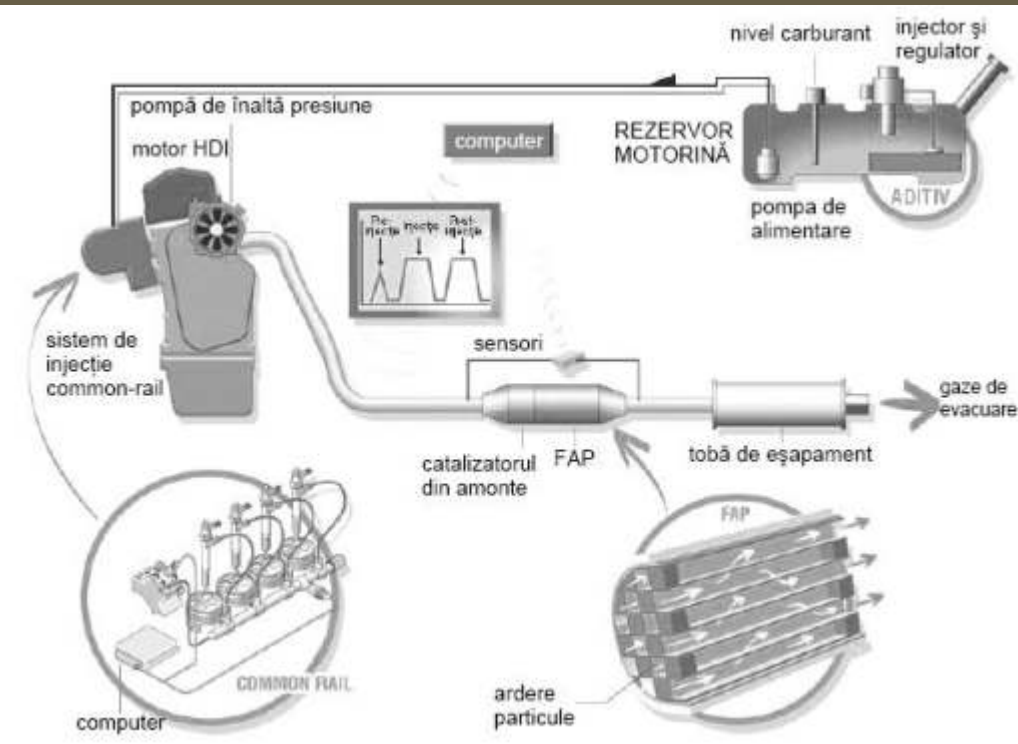


Figura 13.47