

# SUSTAVI ZA SMANJENJE EMISIJE ŠTETNIH PRODUKATA IZGARANJA OTTO MOTORA

---

**Sladić, Domagoj**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2018**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Polytechnic of  
Sibenik / Veleučilište u Šibeniku**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:143:867150>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-11**

*Repository / Repozitorij:*

[VUS REPOSITORY - Repozitorij završnih radova  
Veleučilišta u Šibeniku](#)



**VELEUČILIŠTE U ŠIBENIKU**

**ODJEL PROMET**

**STRUČNI STUDIJ PROMET**

**Domagoj Sladić**

**SUSTAVI ZA SMANJENJE EMISIJE ŠTETNIH  
PRODUKATA IZGARANJA OTTO MOTORA**

**Završni rad**

**Šibenik, 2018.**

**VELEUČILIŠTE U ŠIBENIKU**

**ODJEL PROMET**

**STRUČNI STUDIJ PROMET**

**SUSTAVI ZA SMANJENJE EMISIJE ŠTETNIH  
PRODUKATA IZGARANJA OTTO MOTORA**

**Završni rad**

**Kolegij:** Osnove Strojарstva

**Mentor:** prof. dr. Ernest Bazijanac

**Student:** Domagoj Sladić

**Matični broj studenta:** 1219053321

**Šibenik, rujан 2018.**

## SADRŽAJ:

|   |    |
|---|----|
| 1. UVOD .....   | 7  |
| 2. PROCES IZGARANJA U OTTO MOTORIMA.....  | 9  |
| 2.1. Otto četverotaktni motor.....  | 9  |
| 2.1.1. Konstrukcija i princip rada.....   | 9  |
| 3. PROPISI O DOPUŠTENOJ RAZINI ŠTETNIH PRODUKATA IZGARANJA.....                 | 12 |
| 3.1. Štetna emisija motora s unutarnjim izgaranjem.....                         | 12 |
| 3.2. Propisi o dopuštenoj razini štetnih produkata izgaranja.....               | 13 |
| 3.2.1. Problemi štetne emisije u suvremenim Otto motorima.....                  | 14 |
| 3.2.2. Usklađivanje zahtjeva na svjetskoj razini.....                           | 14 |
| 3.2.3. Ocjena utjecaja propisa na stanje okoliša.....                           | 15 |
| 3.3. Benzinsko gorivo.....  | 18 |
| 3.4. Sumpor u gorivu.....   | 19 |
| 3.4.1. Sadržaj sumpora.....   | 19 |
| 3.5. Razvoj dopuštenih granica štetnih emisija.....                             | 20 |
| 3.6. Sadašnje stanje.....   | 21 |
| 3.7. Mjerenje štetnih emisija.....  | 22 |
| 3.8. Štetne emisije.....  | 25 |
| 4. KONSTRUKCIJSKA RJEŠENJA ZA SMANJENJE RAZINE ŠTETNIH PRODUKATA IZGARANJA..... | 26 |
| 4.1. Rad motora.....  | 26 |
| 4.2. Smanjivanje štetne emisije provodi se.....                                 | 27 |
| 4.2.1. Pročišćavanje ispušnog plina.....  | 28 |

|   |    |
|---|----|
| 4.2.2. Dovod zraka iza ispušnog ventila.....              | 29 |
| 4.3. Mjerenje sastava ispušnog plina i propisi.....       | 29 |
| 4.3.1. Promjena režima rada motora.....                   | 29 |
| 4.4. Mjere za smanjivanje štetne emisije otto motora..... | 31 |
| 4.4.1. Lambda sonda.....                                  | 34 |
| 4.4.2. Širokopolasna i uskopolasna lambda sonda.....      | 36 |
| 4.4.3. Katalizator.....                                   | 37 |
| 4.4.4. Trokomponentni katalizator.....                    | 39 |
| 4.4.5. SCR-katalizator.....                               | 40 |
| 4.4.6. Apsorpcijski katalizator.....                      | 40 |
| 4.5. Motori s vanjskim izvorom paljenja.....              | 41 |
| 4.5.1. Apsorpcijski katalizator za NOx.....               | 41 |
| 4.5.2. Povrat ispušnih plinova – EGR.....                 | 42 |
| 4.5.3. Sustav sekundarnog zraka.....                      | 43 |
| 4.6. Sustavi za paljenje smjese.....                      | 44 |
| 4.6.1. Klasično baterijsko paljenje.....                  | 44 |
| 4.6.2. Tranzistorsko paljenje.....                        | 45 |
| 4.6.3. Elektroničko paljenje.....                         | 46 |
| 5. ZAKLJUČAK.....   | 48 |
| LITERTURA.....  | 49 |

## **SUSTAVI ZA SMANJENJE EMISIJE ŠTETNIH PRODUKATA IZGARANJA OTTO MOTORA**

DOMAGOJ SLADIĆ

Sopaljska 30, Šibenik, [dsladic@vus.hr](mailto:dsladic@vus.hr)

U završnom radu se opisuje sustavi za smanjenje emisije štetnih produkata izgaranja Otto motora, razvijanjem prometa eksponencijalno je rastao i još uvijek raste štetan utjecaj prometa na cjelokupan okoliš. Stoga se razvojem zakonske regulative u području vozila želi postići smanjenje rasta štetnih plinova ili ih barem spustiti na neku zadovoljavajuću razinu. U radu će biti prezentirane mjere kojima se mogu smanjiti emisije štetnih plinova Otto motora.

(49 stranica / 34 slike / 3 tablice / 6 literaturnih navoda / jezik izvornika: hrvatski)

**Rad je pohranjen u:** Knjižnici Veleučilišta u Šibeniku

**Ključne riječi:** Otto motor, katalizator, ispušni plinovi

**Mentor:** prof. dr. Ernest Bazijanac

**Rad je prihvaćen za obranu:** Da

Polytechnic of Šibenik

Final paper

Department of Traffic

Professional Undergraduate Studies of Traffic

## **SYSTEMS FOR REDUCTION EMISSIONS OF DAMAGE PRODUCTS COMBUSTION OTTO ENGINE**

DOMAGOJ SLADIĆ

Sopaljska 30, Šibenik, [dsladic@vus.hr](mailto:dsladic@vus.hr)

The final work describes systems for reducing emissions of damaging combustion Otto engines, by developing traffic exponentially, and still increasing the harmful impact of traffic on the entire environment. Hence, the development of legislation in the vehicle sector aims at reducing the growth of harmful gases or at least bringing them down to a satisfactory level. The paper will present measures to reduce the emissions of harmful gas Otto engines.

(49 pages / 34 figures / 3 tables / 6 references / original in Croatian language)

**Paper deposited in:** Library of Polytechnic in Šibenik

**Keywords:** Otto engine, catalysts, exhaust gases

**Supervisor:** prof. dr. Ernest Bazijanac

**Paper accepted:** Yes

## 1. UVOD

Razvijanjem prometa, eksponencijalno je rastao i još uvijek raste štetan utjecaj prometa na cjelokupan okoliš. Broj registriranih cestovnih vozila u 2017. iznosio je 2 098 159, što je u odnosu na 2016. više za 3,1%. Broj registriranih osobnih vozila u 2017. iznosio je 1 596 087, što je u odnosu na 2016. više za 2,8%. Razvoj zakonske regulative u području vozila započeo je krajem 50-ih i početkom 60-ih godina u SAD-u, Japanu i Europi, najprije na području sigurnosti, a potom i zaštite okoliša. Emisije tvari koje onečišćuju zrak iz mnogih značajnih izvora, poput prometa, industrije i proizvodnje struje, sad su regulirane i općenito su u opadanju, iako ne uvijek do predviđenih okvira. EU je postavila standarde za lebdeće čestice određenih veličina, ozon, sumporni dioksid, dušikove okside, olovo i druge onečišćujuće tvari koje mogu imati štetan učinak na ljudsko zdravlje ili ekosustave.

Homologacijski propisi u Europi su ECE-pravilnici, dok na području Europske unije važe nešto strože EEC-smjernice. Pojedini stupnjevi postrožavanja dopuštene štetne emisije prema navedenim ECE pravilnicima, odnosno smjericama Europske unije nazivaju se Euro 1 , Euro 2 , Euro 3, Euro 4. Proizvođači su željeli imati vozilo koje će se ispitati samo jedanput i prihvatiti svuda , dok su kupci željeli što sigurnije i za okoliš bezopasnije vozilo . Kao rezultat međusobne suradnje državnih ustanova, automobilske industrije, osiguravajućih kompanija i organizacija potrošača stvoren je prvi homologacijski propis u SAD-u 1998. godine pod naslovom 1998 Global Agreement.

Granice dopuštenih emisija za razinu npr. Euro 4 koja se u EU primjenjuje od 2005. godine, u usporedbi s početnim stanjem iz 1990.godine, pokazuju da je ugljik-monoksid CO smanjen za 98 % , ugljikovodici i dušikovi oksidi (HC NO<sub>x</sub>) za 96 % , a čestice za 91 % .

U radu će biti prezentirane mjere kojima se mogu smanjiti emisije štetnih plinova Otto motora. Katalizator koji je najbitniji dio ispušnog sustava, koji se koristi za smanjenje štetnih plinova. Navedene su vrste katalizatora i uvjeti za rad katalizatora, lambda sonda i izvedbe zagrijavanja katalizatora.

Trokomponentni katalizator ima oblik ispušnog lonca u kome se nalazi sačasti uložak prevučeni katalizatorom tj. plemenitim metalom (platinom ili legurom platine i rodija). Katalizator smanjuje tri štetne komponente u ispušnim plinovima: reducira NO<sub>x</sub> i dogorijeva CO i HC.



SCR-katalizator se koristi za smanjenje NO<sub>x</sub> uz pomoć upotrebe dodatne oksidacijske tvari najprikladniji su ugljikovodici.

Apsorpcijski katalizator se upotrebljava za smanjenje NO<sub>x</sub> tako što sadrži pločice olova (Pb) koje upijaju NO i pločice barijevog oksida (BaO) koje upijaju NO<sub>2</sub>. Kad motor radi sa stehiometrijskom smjesom, trostazni i apsorpcijski katalizator za NO<sub>x</sub> rade kontinuirano tj. ponašaju se kao dva trostazna katalizatora.

Povrat ispušnih plinova - EGR dio ispušnih plinova (do 20%) iz ispušne grane preusmjerava se putem reguliranog EGR-ventila ponovo u usis. To smanjuje visoke temperature za vrijeme izgaranja u cilindru, koje su glavni uzročnik stvaranja NO<sub>x</sub>.

## **2. PROCES IZGARANJA U OTTO MOTORIMA**

Ovisno o tome izgara li gorivo unutar ili izvan radnog prostora, toplinske motore dijelimo na motore s vanjskim izgaranjem (gorivo izgara izvan radnog prostora. Primjeri su parni stroj i parna turbina) i unutarnjim izgaranjem.

Podjela motora s unutarnjim izgaranjem

Prema stvaranju smjese i paljenju, motore smo podijelili na Otto motore i Diesel motore, a prema radnim taktovima na četverotaktne i dvotaktne.

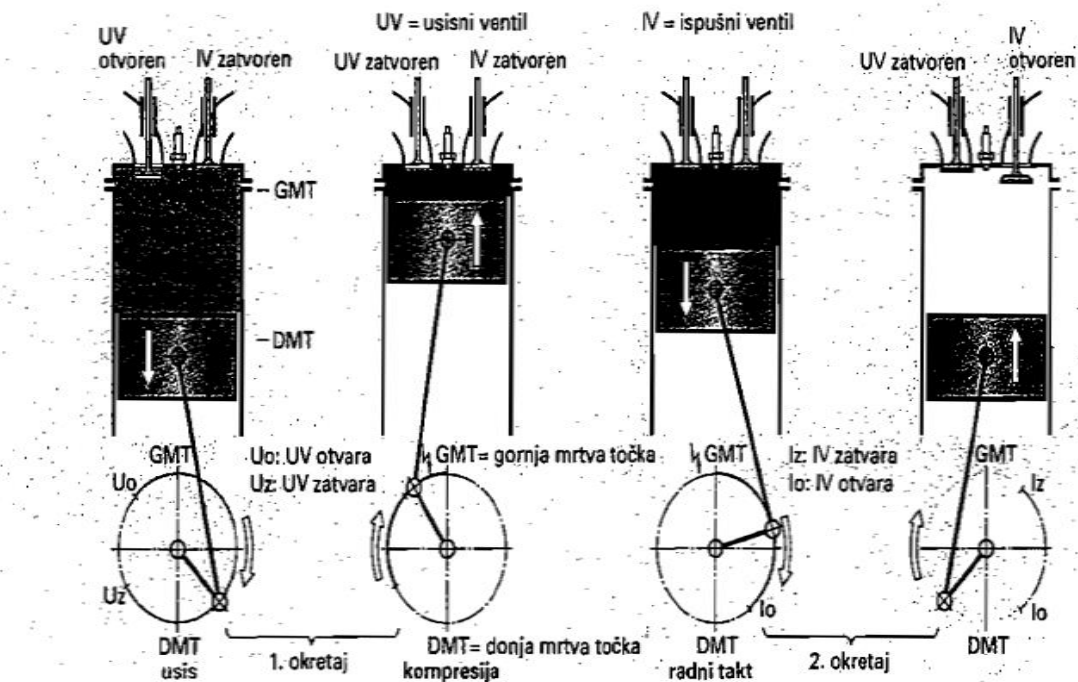
Motorna vozila za pogon najviše koriste četverotaktne Otto i Diesel motore. S obzirom na temu završnoga rada, detaljnije će se opisati proces rada četverotaktnog Otto motora:

### **2.1. Otto četverotaktni motor**

#### **2.1.1. Konstrukcija i princip rada**

Otto motor: Princip rada je paljenje smjese goriva i zraka vanjskim izvorom energije odnosno električnom iskrom. Četverotaktni Otto motor ima 4 takta. Prvi takt je usis smjese. Kretnjom klipa iz GMT-a prema DMT-u otvara se usisni ventil koji se zatvara nešto prije dolaska klipa u DMT -u. Slijedi drugi takt (kompresija). Kretnjom klipa iz DMT-a prema GMT-u klip komprimira smjesu koja se zapaljuje nekoliko stupnjeva prije GMT-a. Kod Otto motora svjećica zapaljuje smjesu zraka i benzina. Treći takt je radni takt (ekspanzija). Klip se giba iz GMT-a prema DMT-u eksplozijom nastalom zapaljivanjem smjese. Nešto prije DMT -a otvara se ispušni ventil i klip svojim gibanjem prema GMT-u istiskuje izgorenu smjesu izvan cilindra. Nešto prije GMT -a otvara se usisni ventil koji dodatno pospješuje ispiranje cilindra. Dolaskom klipa u GMT-a zatvara se ispušni ventil i završava ispušni takt, te proces počinje ispočetka.

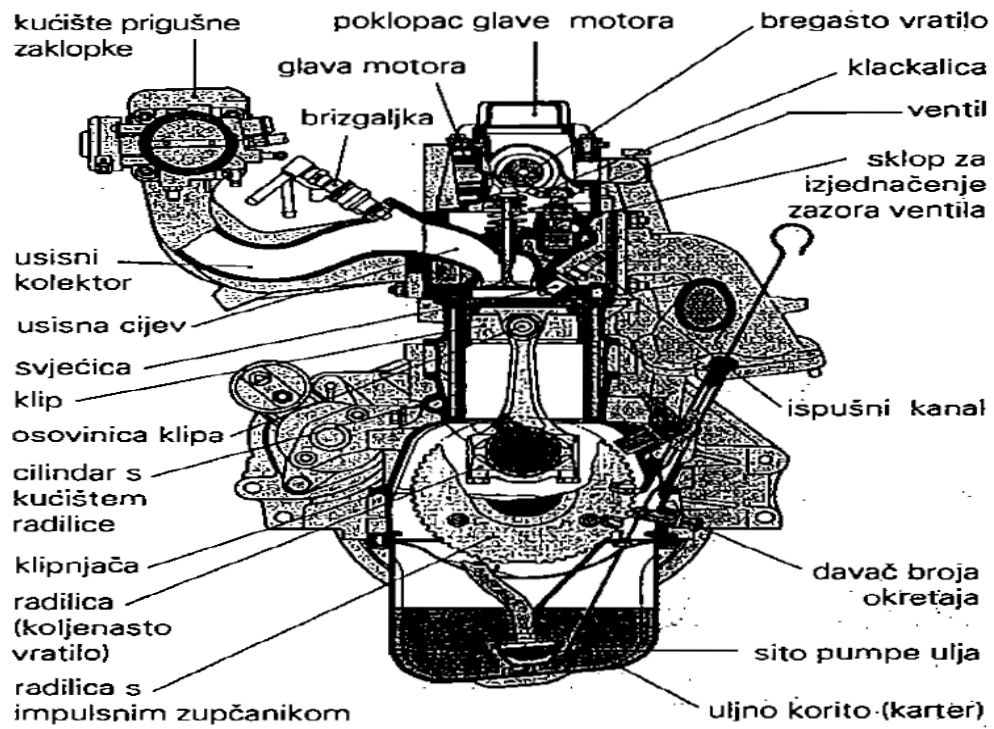
**Slika 1.** Četiri takta radnog ciklusa



Četverotaktni Otto motor, (slika 2.), ima četiri osnovna dijela i dodatne sustave:

- kućište motora - krarter (uljno korito), blok motora, glava, poklopac glave i brtva
- klipni mehanizam – klipovi, klipnjače i radilica (koljenasto vratilo)
- razvodni mehanizam – ventili, opruge, klackalice, podizači ventila, bregasto vratilo, remeni ili lančani prijenos
- sustav za stvaranje smjese – spremnik, pumpa, filter (pročistač) goriva, usisna cijev, sustav ubrizgavanja
- pomoćni sustavi – sustav za paljenje, podmazivanje, hlađenje, ispušni sustav.

Slika 2. Konstrukcija Otto motora



## **3. PROPISI O DOPUŠTENJOJ RAZINI ŠTETNIH PRODUKATA IZGARANJA**

### **3.1. Štetna emisija motora s unutarnjim izgaranjem**

Ispušni plinovi motora s unutarnjim izgaranjem sadrže preko sto različitih spojeva koji su gotovo svi otrovni ili na neki način štetni.

Homologacijskim propisima je kod motora cestovnih vozila ograničena količina štetnih ovih tvari koje vozilo ispušta u okoliš:

- CO, HC, NO<sub>x</sub>
- čestica (sastoje se najvećim dijelom od čađe)
- od 2005. g. i nemetanskih ugljikovodika (NMHC)

**Ugljični monoksid (CO)** je vrlo otrovan plin koji smanjuje sposobnost prenošenja kisika u krvi, te nazočnost relativno malih koncentracija CO izaziva gubitak svijesti, trovanje i smrt nakon nekog vremena. Ovom plinu se posvećuje najveća pozornost i njegova koncentracija iznad dopuštenih granica neposredni je razlog neoprolaska vozila na tzv. eko testu.

Nastaje kao produkt nepotpunog izgaranja, pa zbog toga u području bogate smjese (kada ima viška goriva) postoji gotovo linearna ovisnost CO o faktoru zraka  $\lambda$ , odnosno što je smjesa bogatija to je koncentracija CO sve viša. U području siromašne smjese ne postoji znatan utjecaj smjese na promjenu koncentracije CO – uvijek je relativno mala.

**Ugljikovodici (HC)** su također produkt nepotpunog izgaranja. Pored naziva ugljikovodici vrlo često se kaže neizgoreni ugljikovodici. Naime HC je gorivo koje bi u potpunosti trebalo izgorjeti u cilindrima, ali u relativnim uvjetima izgaranja to se nikad ne dogodi. HC su otrovni za biljni svijet a u većim koncentracijama i na zdravlje ljudi.

Najmanja koncentracija HC se postiže u području blago siromašne smjese  $\lambda = 1,1$ . U području bogate smjese HC se ponaša slično kao i CO, odnosno što je smjesa bogatija to je koncentracija HC sve veća (goriva ima više od zraka pa ne uspije svo izgorjeti), ali porast se

događa i u području siromašne smjese. Razlog porasta HC pri siromašnoj smjesi (tada goriva ima manje od zraka) objašnjava se sniženim temperaturama izgaranja koje za posljedicu imaju ranije gašenje gorive smjese u cilindrima te neizgaranje ukupne mase goriva.

**Dušikov oksid (NO<sub>x</sub>)** je vrlo ovisan o faktoru zraka. Najveći sadržaj se postiže u području blago siromašne smjese  $\lambda = 1.05$ . U području bogate smjese gotovo sav kisik sudjeluje u postupku izgaranja pa se tek manji dio veže uz dušik. U području siromašne smjese temperature izgaranja su niže pa se kisik ne može vezivati s dušikom, zbog toga opada koncentracija NO<sub>x</sub>.

Dušikovi oksidi su također štetni plinovi za ljudsko zdravlje a prvenstveno nadražuju i oštećuju dišne organe.

### **3.2. Propisi o dopuštenoj razini štetnih produkata izgaranja**

Homologacijski propisi u Europi su ECE-pravilnici 1 , dok na području Europske unije važe nešto strože EEC-smjernice 2 . ECE-pravilnici donose se na temelju Sporazuma u Genevi iz 1958. godine , koji je donesen pri Ekonomskoj komisiji za Europu (ECE) Ujedinjenih nacija(UN). Do danas, 2004. godine, doneseno je ukupno 114 ECE-pravilnika. Sve zemlje koje su pristupile tom sporazumu (Hrvatska je dvadesetpeti po redu) dužne su se pridržavati ovih pravilnika. Osnovni cilj stvaranja pravilnika je donošenje jedinstvenih propisa za proizvodnju vozila, koji kao konačnu posljedicu imaju jedinstvene metode ispitivanja, odnosno provjere da li vozila zaista zadovoljavaju propisane zahtjeve. Ispitivanja vrše ovlaštene laboratoriji širom Europe(Hrvatska nema nijedan) a rezultati ispitivanja se priznaju u svim zemljama koje su prihvatile Sporazum. Na taj je način olakšana trgovina između tih zemalja, jer ispitivanja ne treba ponavljati u zemlji koja uvozi vozila. S druge strane ti su propisi postali administrativnom barijerom uvozu automobila proizvedenih prema propisima koji važe na drugim tržištima, primjerice u SAD-u i u Japanu. Vozila iz tih zemalja namijenjena izvozu u Europu moraju biti drugačije opremljena i ispitana po metodama koje odgovaraju europskim propisima. Isto tako vozila europskih proizvođača koja se izvoze moraju biti proizvedena i ispitana sukladno propisima na tim drugim tržištima. Posljedice su paradoksalne, pa tako vozila kojima se vozi cijela Amerika nisu dobra za Europu, i obratno.

Pravilnikom ECE R-83 3 propisane su razine dozvoljene štetne emisije 4 vozila kategorije M1 (putnički automobili s 18 sjedala) i kategorije N1 (teretna vozila ukupne dozvoljene mase do 3.5 t) pogonjenih motorima sa stranim izvorom zapaljenja (Otto) i motora s kompresijskim paljenjem (Diesel). Pravilnikom ECE R-49 propisane su razine dozvoljene štetne emisije 5 vozila ukupne mase preko 3.5 t pogonjenih motorima s kompresijskim paljenjem, motorima na pogon stlačenim prirodnim plinom (pretežno metan) i motorima sa stranim paljenjem pogonjenim tekućim naftnim plinom (propan butan). Pravilnik ECE R-24 odnosi se na dimljenje Diesel motora.

Pojedini stupnjevi postrožavanja dopuštene štetne emisije prema navedenim ECE pravilnicima, odnosno smjernicama Europske unije nazivaju se Euro 1 , Euro 2 , Euro 3.

### **3.2.1. Problemi štetne emisije u suvremenim Otto motorima**

Pri izgaranju u cilindru suvremenih Otto motora postavljaju se dva glavna cilja :

- 1. štetna emisija** mora biti unutar dopuštenih granica
- 2. specifična potrošnja** goriva treba biti što niža

Težnja je da se ovi ciljevi dostignu u prvom redu optimiranjem procesa izgaranja u cilindru. Međutim, pri današnjem stupnju razvoja tehnike to nije moguće pa se pored toga provodi i pročišćavanje ispušnih plinova nakon što oni izađu iz cilindra. Dopuštena emisija štetnih tvari u ispušnim plinovima motora određena je homologacijskim propisima, kod motora na pogon motornim benzinom u Europi je to pravilnik ECE R-83, odnosno odgovarajuća smjernica Europske unije 6. Ti propisi određuju samo dopuštene granice štetne emisije i način njezina mjerenja.

### **3.2.2. Usklađivanje zahtjeva na svjetskoj razini**

Razvoj zakonske regulative u području vozila započeo je krajem 50-ih i početkom 60-ih godina u SAD-u, Japanu i Europi, najprije na području sigurnosti, a potom i zaštite okoliša. U rasponu želja i mogućnosti proizvođači su željeli imati vozilo koje će se ispitati samo jedanput i prihvatiti svuda , dok su kupci željeli što sigurnije i za okoliš bezopasnije vozilo.

Kao rezultat međusobne suradnje državnih ustanova, automobilske industrije, osiguravajućih kompanija i organizacija potrošača stvoreni su prvi homologacijski propisi za proizvodnju vozila. Pa je u SAD-u 1998. god. pokrenuto stvaranje svjetske homologacije pod naslovom 1998. god. Global Agreement.

### **3.2.3. Ocjena utjecaja propisa na stanje okoliša**

Propisi, koji su se u početku donijeli, a koji danas izgledaju pomalo naivno, znatno su se razlikovali u pojedinim regijama. S vremenom su pretrpjeli znatne izmjene, pa su prvotne odredbe uvelike unaprijeđene, a emisija štetnih sastojaka bitno ograničena. Navedene izmjene također ujednačavaju propise u raznim regijama, pa je sada uglavnom moguće usuglašavanje zakonskih odredaba, odnosno rezultata mjerenja, u regijama širom svijeta. Neke od zajedničkih značajki sadašnjih propisa jesu sljedeće:

- Prihvaćeno je razrjeđivanje ispušnog plina pri njegovu skupljanju u plastične vreće, i prije mjerenja sadržaja štetnih sastojaka. Time je izbjegnuto taloženje vode iz ispušnog plina prije mjerenja njegova sastava.
- Pri provođenju ispitivanja mjeri se prosječan sadržaj bitnih sastojaka u emitiranom ispušnom plinu.
- Sadržaj štetnih sastojaka određen je masom po jedinici prijeđenog puta, ili jedinici izvršenog rada, ili po jednom testu
- Smanjuje se broj kategorija vozila ili motora, pa se teži jedinstvenom propisivanju emisije štetnih sastojaka, bez obzira na masu vozila ili vrstu motora.
- Razmatra se povećanje brzine pri vožnji, po europskom ciklusu.
- Istražuje se mogućnost usuglašavanja rezultata mjerenja u odnosu prema različitim zakonima.

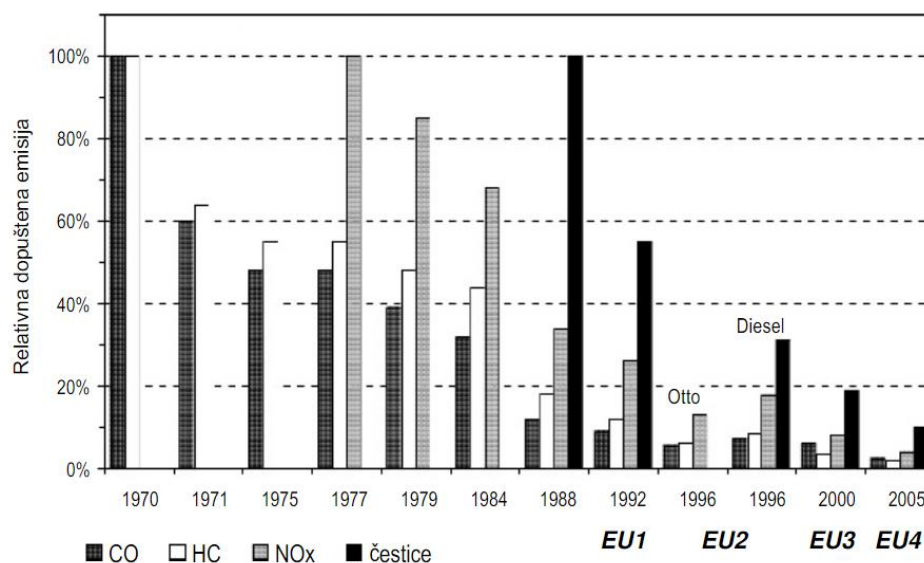
Zakoni u SAD-u i Europi također obuhvaćaju emisiju drugih kategorija motora. U SR Njemačkoj od 1986. su godine poznate norme TA-Luft (Technische Anleitung Luft) smjernice za kontrolu onečišćenja zraka, a u SAD-u EPA-norme (Environmental Protection Agency).



Za stacionarne motore predviđeno je ograničenje:

- 0,13 g/m<sup>3</sup> čađe
- 0,42 g/m<sup>3</sup> sumpor-dioksida, SO<sub>2</sub>
- 0,02 g/m<sup>3</sup> formaldehida, HCHO
- 0,15 g/m<sup>3</sup> ugljikovodika, CH (bez CH<sub>4</sub>)
- 0,65 g/m<sup>3</sup> ugljik-monoksida, CO
- 2 g/m<sup>3</sup> dušikovih oksida, NO<sub>x</sub> kod Diesel motora snage ≥ 3 MW
- 4 g/m<sup>3</sup> dušikovih oksida, NO<sub>x</sub> kod Diesel motora snage < 3 MW
- 0,50 g/m<sup>3</sup> dušikovih oksida, NO<sub>x</sub> kod 4-taktnih plinskih motora
- 0,80 g/m<sup>3</sup> dušikovih oksida, NO<sub>x</sub> kod 2-taktnih plinskih motora.

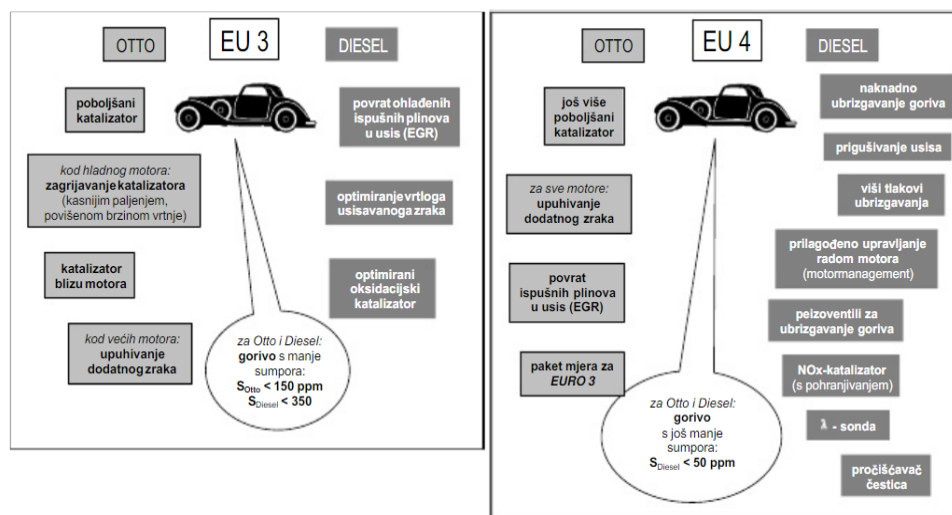
**Slika 3.** Smanjivanje granica štetne emisije u zemljama Europske zajednice. Pojedine razine zahtjeva nazvane su imenima Euro 1 , Euro 2 , Euro 3 i Euro 4



Sporazum iz 1952. godine “World Forum for the Harmonization of Vehicle Regulations” (svjetski forum za usklađivanje / harmonizaciju pravilnika za vozila) , a sjedište mu je pri UN/ECE u Genevi. Njegova je svrha ustanovljavanje procesa u kome će se države iz svih dijelova svijeta moći pridružiti razvoju svjetskih tehničkih propisa u području sigurnosti, zaštite okoliša, povećanja ekonomičnosti i zaštiti od krađe vozila, motora i sklopova.

Zajednički krajnji cilj stalno je unapređivanje *vozila* upravo na tim područjima, stvaranjem zakonskih okvira za automobilsku industriju i za potrošače u cijelome svijetu. Sporazum su trenutno ratificirale 62 zemlje, neke od važnijih zemalja su: Europska unija, Ruska Federacija, Australija i Ujedinjeno Kraljevstvo. Zemljama u razvoju sporazum dopušta postupno uvođenje usklađivanja / harmonizacije tako što će pravilnici sadržavati različite razine strogoće propisanih zahtjeva.

**Slika 4.** Nužna tehnika pročišćavanja ispušnih plinova osobnih vozila za EU 3 i EU 4 prema prognozama s početka 2000. godine



Snižavanje razine dopuštene štetne emisije ispušnih plinova uvođenjem propisa Euro 3 i Euro 4 postavlja nove zadaće pred proizvođače vozila, ali i pred proizvođače goriva (slika 4.), što je posebno važno za Hrvatsku. Euro 3 (od 2000. g.) je kao bitne novosti donio ugrađeni sustav automatske dijagnoze (On-Board Diagnose) te pooštrene metode ispitivanja štetne emisije uz uzimanje u obzir i emisije u fazi zagrijavanja hladnog motora, pooštreno ispitivanje emisije para goriva, kao i ispitivanje emisije tijekom uporabe vozila. Radi zadovoljavanja tih normi proizvođači su morali izvršiti odgovarajuća poboljšanja na svojim vozilima, a također je bilo nužno uvesti goriva s malim sadržajem sumpora ( $S < 150 \text{ mg/kg}$  u benzinu, odnosno  $S < 350 \text{ mg/kg}$  u Diesel gorivu).

Uvođenjem razine Euro 4 (od 2005.) dopuštene štetne emisije su u odnosu na Euro 3 snižene za približno 50% za Otto i Diesel motore, a trajnost sustava za pročišćavanje ispušnih plinova povećana je od 80.000 na 100.000 km. Benzin i Diesel gorivo smiju imati sumpora najviše 50 mg/kg.

Mjere koje su bile potrebne za Euro 3 (u odnosu na Euro 2) :

- **za vozila s Otto motorima:** poboljšani katalizator, zagrijavanje katalizatora (kasnijim upaljenjem gorive smjese i povećanjem brzine vrtnje motora u praznome hodu), smještaj katalizatora što bliže motoru, upuhivanje sekundarnog zraka u ispušnu cijev kod motora velikoga radnog obujma

- **za vozila s Diesel motorima:** hlađenje ispušnih plinova koji se vraćaju natrag u cilindar, optimiranje vrtložnog strujanja u cilindru, optimiranje oksidacijskoga katalizatora.

Euro 3 za vozila kategorija M1 i N1 s Otto motorima na snazi je od 1.1.2000. god., a s Dieslovim motorima od 1.1.2003. god. (M1) odnosno 1.1.2005. god. (N1).

Potrebne dodatne mjere za Euro 4 (u odnosu na Euro 3) :

- **za vozila s Otto motorima:** još bolji katalizator, upuhivanje sekundarnog zraka u ispušnu cijev

- **za vozila s Diesel motorima:** naknadno ubrizgavanje goriva za vrijeme ekspanzije u cilindru, prigušivanje usisa, viši tlakovi ubrizgavanja, prilagođeno upravljanje radom motora (motormanagement), piezo ventili za ubrizgavanje goriva, NO<sub>x</sub>-katalizator,  $\lambda$  -sonda, pročišćavač za hvatanje čestica.

Euro 4 je za vozila kategorija M1 (do 2500 kg) i N1 stupio na snagu 1.1.2005. god.

### 3.3. Benzinsko gorivo

S obzirom na vrstu aditiva koji se dodaje gorivu za povećanje otpornosti prema detonaciji (detonacija – nekontrolirano izgaranje) postoje dvije osnovne vrste benzinskoga goriva: olovni i bezolovni benzini.

U olovno gorivo (benzin s crvenom oznakom) se kao aditiv protiv detonacije dodaje olovni aditiv (tetraetil-olovo). Međutim, kako olovni aditiv uništava katalizatore ovo gorivo se smije koristiti samo u motorima bez katalizatora.

U bezolovno gorivo (benzin sa zelenom oznakom) se kao aditivi dodaju mješavine raznih alkohola i etera. Bezolovna goriva su namijenjena prvenstveno za pogon motora opremljenih katalizatorom, ali se mogu koristiti i u pojedinim motorima koji nisu opremljeni katalizatorom.

U EU se olovni benzin prestao prodavati 01.01.2000. god., a u Hrvatskoj 01.01.2006. god.

### 3.4. Sumpor u gorivu

U usporedbi s konvencionalnim gorivima, primjenom goriva bez sumpora ( $S < 10 \text{ mg/kg}$ ) u ispušnim plinovima motora izravno se smanjuje sadržaj čestica, HC, NO<sub>x</sub> i CO a neizravno i emisija CO<sub>2</sub> jer se smanjuje potrošnja goriva.

#### 3.4.1. Sadržaj sumpora

Problemi uslijed sumpora u gorivu uočeni su najprije kod Diesel motora, gdje ono dovodi do povećanja koncentracije čađe koja se očituje kao crni dim iz ispušne cijevi motora pod povećanim opterećenjem. O sumporu kod benzina po prvi se puta počelo raspravljati početkom 1990-ih godina pa je tako 1992. u EU bilo predloženo ograničavanje sadržaja sumpora u budućim benzinima, ali su ograničenja uvedena tek 1996. godine.

**Tablica 1.** Podjela goriva na 4 kategorije i udio sumpora prema prijedlogu Worldwide Fuel Charter 4th Edition, 2005 u usporedbi s razinama dopuštenih emisija u Europi

|                              |  | Kategorija 1  | Kategorija 2   | Kategorija 3  | Kategorija 4  |
|------------------------------|--|---|--|---|---|
| Razina emisijskih zahtjeva → |  | Nema ili prvi stupanj, Tier 0, Euro 1   | Tier 1, Euro 2 ili 3   | US/Cal LEV ili ULEV, Euro 3 JP 2005   | Tier 2, Cal LEV II, Euro 4, HD (US 2007/10, non-road Tier 4, Euro 5)  |
| EU → (benzin)                | (1000) <sup>d</sup>                        | Euro 2 (1996.)<br>500   | Euro 3 (2000.)<br>150  | Euro 4 (2005.)<br>50  | (Euro 5; 2009.)<br>(10)   |
| S (mg/kg) BENZIN             |  | 1000  | 150  | 30  | 10  |
| S (mg/kg) DIZEL              |  | 2000 (3000*)  | 300  | 50  | 10  |
| EU → (dizel)                 | EU 1993 2000<br>EU 1987: 3000 <sup>e</sup> | Euro 2 (1996.)<br>500   | Euro 3 (2000.)<br>350  | Euro 4 (2005.)<br>50  | (Euro 5; 2009.)<br>(10)   |
| Namjena →                    |  | Tržišta bez ili s prvom razinom regulacije štetnih emisija, temeljena prvenstveno samo na osnovnim sustavima regulacije emisija.<br><br>* 3000 samo u prijelaznom razdoblju | Tržišta s blagim zahtjevima vezanim uz regulaciju štetnih emisija ili drugih zahtjeva tržišta. | Tržišta s naprednim zahtjevima vezanim uz regulaciju štetnih emisija ili drugih zahtjeva tržišta. | Tržišta s budućim naprednim zahtjevima vezanim uz štetne emisije, koji omogućuju korištenje napredne tehnologije za pročišćavanje ispušnih plinova (smanjenje emisija NO <sub>x</sub> i čestica).<br>(Ovdje spadaju motori s izravnim ubrzgavanjem sa siromašnom smjesom) |

**Tablica 2.** Sadržaj sumpora (mg/kg) u gorivima u Europskoj uniji

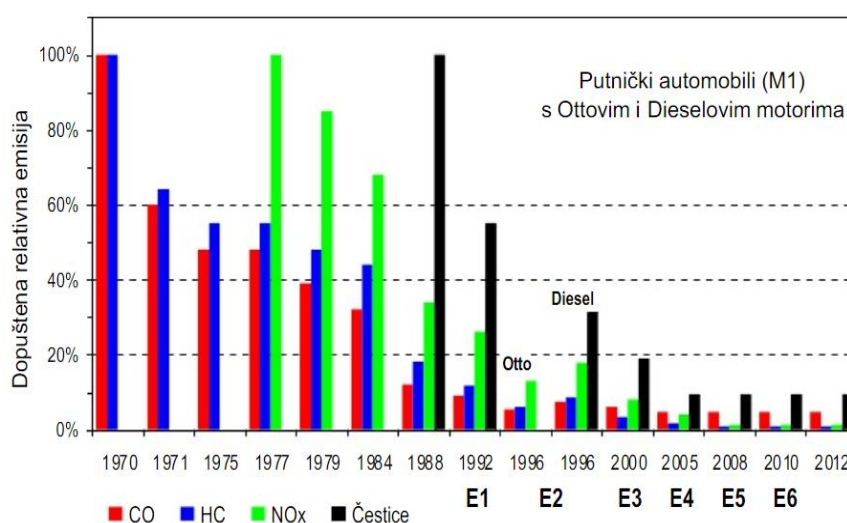
| Godina | Benzin           | Dizel | Direktiva              |
|--------|------------------|-------|------------------------|
| 1993   | 500 <sup>7</sup> | 2000  | 93/12/EEC (samo dizel) |
| 1996   |                  | 500   | 93/12/EEC (samo dizel) |
| 2000   | 150              | 350   | 97/70/EC               |
| 2005   | 50               | 50    | 97/70/EC, 2003/17/EC   |
| 2009   | 10               | 10    | 97/70/EC, 2003/17/EC   |

### 3.5. Razvoj dopuštenih granica štetnih emisija

U ispušnim plinovima automobilskih motora u Europi je isprva bila ograničena samo emisija ugljik-monoksida CO, od 1970. godine i emisija ugljikovodika HC, od 1977. uvedeno je ograničenje dušikovih oksida NO<sub>x</sub> (najprije samo za Otto motore), a od 1988. je ograničena i količina čestica kod Diesel motora.

Od 1992. godine pojedine razine dopuštenih štetnih emisija nose naziv Euro. Ograničenja se kod Otto motora otada mogu zadovoljiti samo primjenom reguliranog katalitičkog konvertora s lambda-sondom i bezolovnog benzina.

**Slika 5.** Smanjivanje dopuštenih štetnih emisija u EU



Navedeni su relativni iznosi jer su izravne usporedbe otežane zbog toga što su se u međuvremenu promijenile i metode mjerenja i način iskazivanja rezultata (% , g/km, g/test).

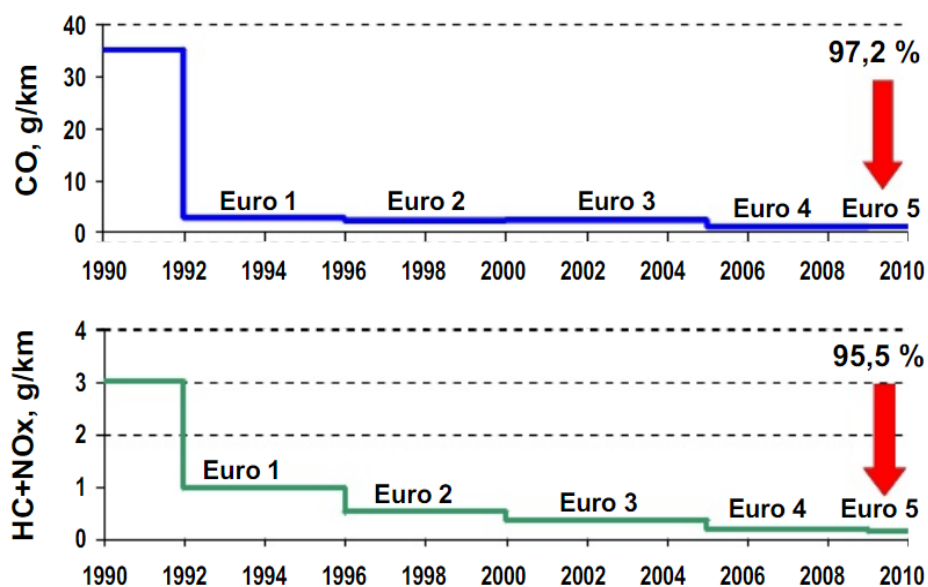
**Tablica 3.** Granične vrijednosti emisija štetnih tvari vozila kategorije M1 (putnička vozila)

|               | Stupanje na snagu | CO (g/km) | HC (g/km) | HC+NO <sub>x</sub> (g/km) | NO <sub>x</sub> (g/km) | PM (g/km) |
|---------------|-------------------|-----------|-----------|---------------------------|------------------------|-----------|
| <b>Diesel</b> |                   |           |           |                           |                        |           |
| Euro 1        | 1992/07           | 3,16      | -         | 1,13                      | -                      | 0,18      |
| Euro 2, IDI   | 1996/01           | 1,00      | -         | 0,70                      | -                      | 0,08      |
| Euro 2, DI    | 1996/01           | 1,00      | -         | 0,90                      | -                      | 0,10      |
| Euro 3        | 2000/01           | 0,64      | -         | 0,56                      | 0,50                   | 0,05      |
| Euro 4        | 2005/01           | 0,50      | -         | 0,30                      | 0,25                   | 0,025     |
| Euro 5        | 2009              | 0,50      | -         | 0,25                      | 0,20                   | 0,005     |
| <b>Otto</b>   |                   |           |           |                           |                        |           |
| Euro 1        | 1992/07           | 3,16      | -         | 1,13                      | -                      | -         |
| Euro 2        | 1996/01           | 2,20      | -         | 0,50                      | -                      | -         |
| Euro 3        | 2000/01           | 2,30      | 0,20      | -                         | 0,15                   | -         |
| Euro 4        | 2005/01           | 1,00      | 0,10      | -                         | 0,08                   | -         |
| Euro 5        | 2009              | 1,00      | 0,075     | -                         | 0,06                   | 0,005     |

### 3.6. Sadašnje stanje

Daleko najbrojnija od svih vozila u svijetu su putnička, kategorije M1, a zbog manje potrošnje goriva najtraženiji je Diesel motor. Granice njihovih dopuštenih emisija za razinu Euro 4 koja se u EU primjenjuje od 2005. godine, u usporedbi s početnim stanjem iz 1990. godine, pokazuju da je ugljik-monoksid CO smanjen za 98 %, ugljikovodici i dušikovi oksidi (HC NO<sub>x</sub>) za 96 %, a čestice za 91 %. Projekcije smanjenja Euro 5 za ostale kategorije vozila i motore prikazane su na slici 6.

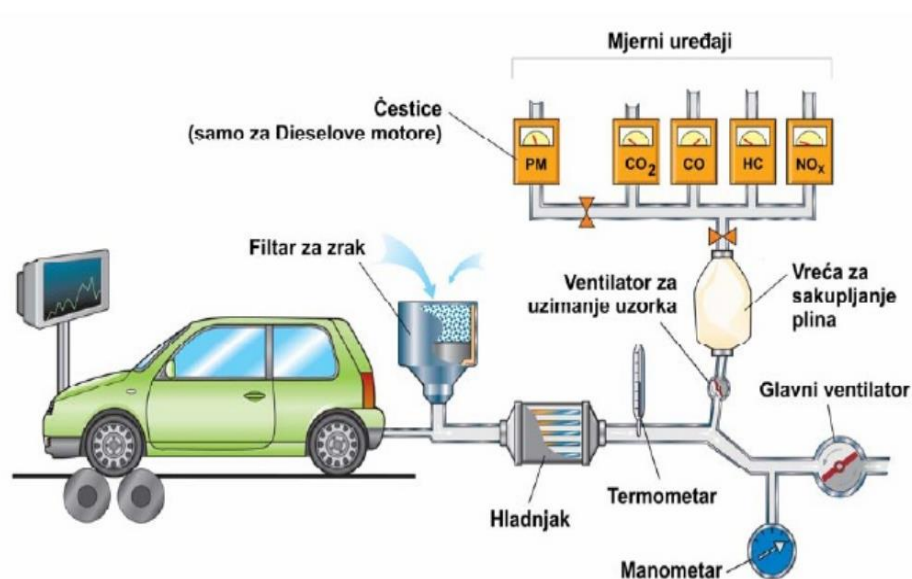
**Slika 6.** Putnička vozila M1 s Otto motorom: smanjivanje dopuštenih štetnih emisija



### 3.7. Mjerenje štetnih emisija

Emisije štetnih tvari putničkih (kategorija M1) i lakih teretnih vozila (N1) ispituju se tako da se na posebnom ispitnom uređaju simulira vožnja prema novom europskom voznom ciklusu NEDC (engl. New European Driving Cycle), a ispušni plinovi se hvataju u posebne vreće te se analizira njihov sastav i izračunava se emisija.

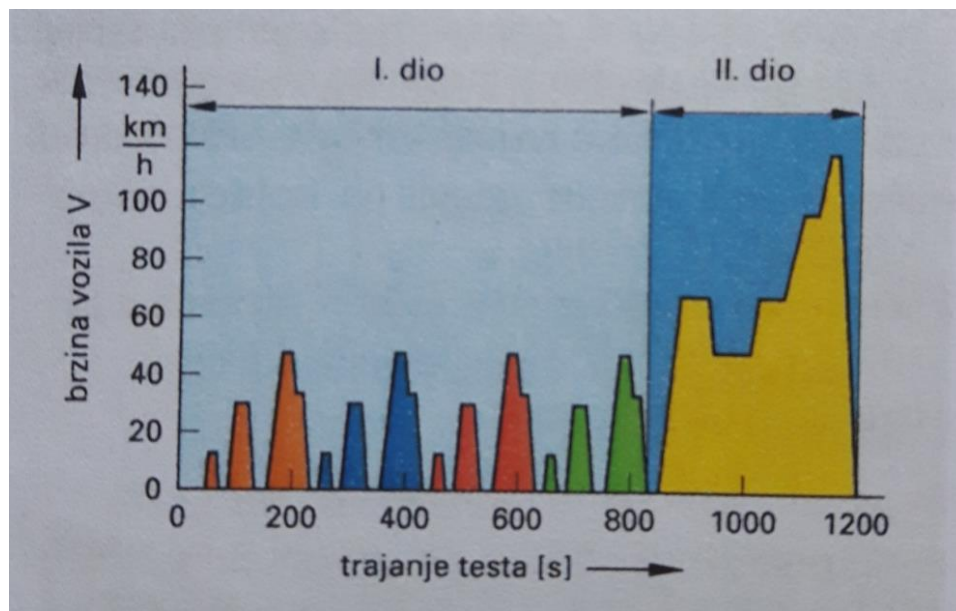
**Slika 7.** Shema uređaja za mjerenje štetnih emisija putničkih vozila



**Europa-test** (europski vozni program slika 8. Za osobna vozila do 2500 kg dopuštene ukupne težine i laka teretna vozila do 3500 kg). Europa-test sastoji se iz dva dijela:

- **prvi dio** – simulira gradsku vožnju brzinom do 50 km/h, i provodi se s hladnim startom motora. Program se unutar 13 minuta provodi sukcesivno 4 puta, bez pauze
- **drugi dio** – odgovara međugradskoj vožnji s trajanjem od 7 minuta i maksimalnom brzinom oko 120 km/h.

**Slika 8.** Europa test (europski ciklus vožnje)



Tijekom cijelog testa ispušni se plinovi skupljaju i analiziraju štetne tvari. Granične vrijednosti izražene u g/km ne smiju se prekoračiti bez obzira na radni volumen motora.

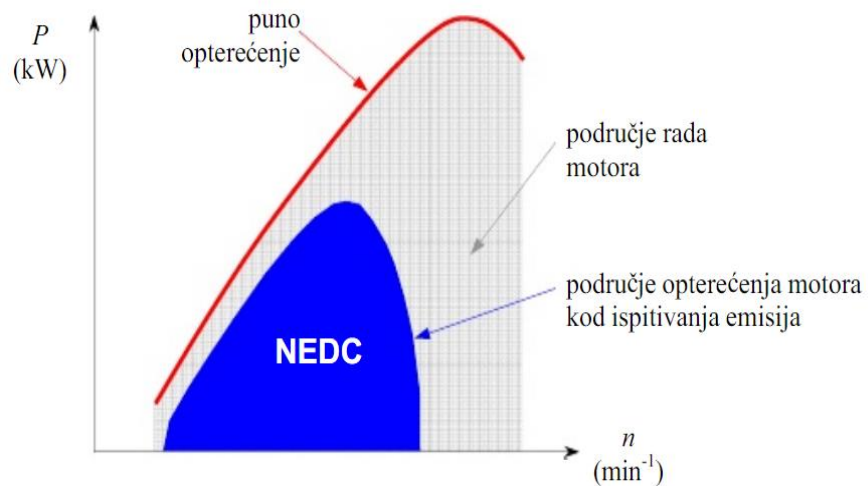
Kontrola ispušnih plinova provodi se u određenim vremenskim intervalima (tehnički pregled vozila). Osim toga, ispituju se i provjeravaju:

- suženja na uljevnom grlu spremnika goriva
- regulacijski krug
- elementi sustava koji utječu na emisiju štetnih tvari
- paljenje.

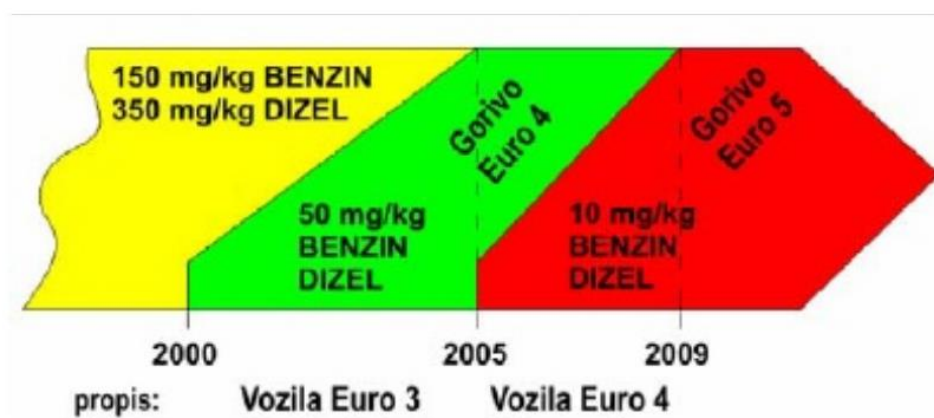
**On Bord Diagnose (OBD)** – Kod OBD-a mogu se sve pogreške na motor-managementu (ubrizgavanje, paljenje) i sustavima ispuha, kao i dobave goriva, pohraniti u upravljačkom sklopu. Kontrolna žaruljica (indikator) na ploči s instrumentima upozorava vozača o neispravnosti koju se mora čim prije otkloniti primjerenim postupkom.



**Slika 9.** Opterećenje motora putničkog vozila M1. Za vrijeme ispitivanja štetnih emisija vozilo vozi prema voznom ciklusu NEDC, pri čemu se koristi samo jedan manji dio cjelokupnoga radnoga područja



**Slika 10.** Princip uvođenja novih goriva u EU: istovremeno uz trenutno važeće odmah se uvodi i gorivo buduće emisijske razine



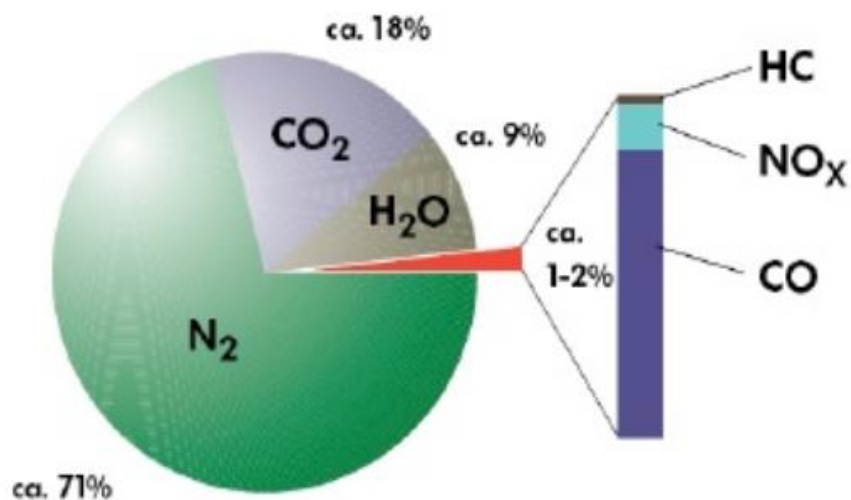
Kao što je prikazano na slici 10. novo gorivo se na tržištu mora ponuditi već u prethodnom ciklusu. Npr. za motore Euro 4 koji su na tržištu morali biti od početka 2005. gorivo je moralo biti na raspolaganju već od 2000. (kada je za proizvodnju vozila stupio na snagu propis Euro3). To zbog toga da bi se u tom periodu (2000. do 2005.) vozila Euro 4 mogla plasirati na tržište, te da bi se njihova tehnička rješenja do datuma obavezne primjene poboljšala do zahtijevane razine.

### 3.8. Štetne emisije

Velika većina vozila će barem dvadeset idućih godina i dalje koristiti benzin i Diesel gorivo. U tim gorivima najveći udio imaju ugljikovodici. Osim neškodljive vodene pare glavni produkt izgaranja ovih goriva je  $\text{CO}_2$ , staklenički plin bez neposrednog štetnog djelovanja na ljudsko zdravlje. Iako je izgaranje goriva u motorima neusporedivo bolje od izgaranje u većini ložišta, zbog brojnosti motornih vozila velike su i količine štetnih tvari u njihovim ispušnim plinovima. Od svih štetnih sastojaka zakonskim su propisima ograničene emisije ugljik-monoksida (CO), ugljikovodika (HC), i dušikovih oksida ( $\text{NO}_x$ ) kod motora s vanjskim izvorom paljenja (Otto motor), a kod motora s kompresijskim paljenjem (Diesel motor) i emisija krutih čestica (PM 1).

Iako je njihov udio u ukupnoj količini ispušnih plinova vrlo malen (slika 11.), ti štetni sastojci uzrokuju probleme po zdravlje čovjeka i onečišćenje okoliša.

**Slika 11.** Prosječan sastav nepročišćenih ispušnih plinova Otto motora (prije katalitičkog konvertora)



## 4. KONSTRUKCIJSKA RJEŠENJA ZA SMANJENJE RAZINE ŠTETNIH PRODUKATA IZGARANJA

### 4.1. Rad motora

Na proces izgaranja, a time i na sastav ispušnog plina, znatno utječe konstrukcija komore izgaranja, strujanje plina u cilindru, temperaturno polje, kakvoća goriva. Kod Otto je motora od velike važnosti točno održavanje odnosa goriva i zraka u smjesi koja ulazi u cilindar. Taj se odnos redovito označava faktorom zraka  $\lambda$ , koji se u svim promjenljivim uvjetima rada nalaziti u optimalnim granicama. Za održavanje faktora zraka mjerodavan je uređaj za napajanje gorivom, zbog čega je vrlo značajan razvitak konstrukcije rasplinjača, a posebno ubrizgavanja goriva.

Smjesa goriva i zraka u cilindru mora biti što je više moguće homogena. To znači da će gorivo u isparenom stanju biti jednoliko izmiješano sa zrakom, zbog čega će izgaranje svakog dijela smjese biti optimalno. Na sastav ispušnog plina znatno utječe uređaj za paljenje, a posebno položaj svjećeice u cilindru, energija i trajanje iskre, te trenutak preskakanje iskre. Već se duže vremena istražuju konstrukcije Otto motora sa slojevitim punjenjem, pri čemu se u područje svjećeice dovodi bogata smjesa, kako bi se osiguralo paljenje, a u ostali se dio cilindra dovodi krajnje siromašna smjesa. U tim je motorima smjesa u prosjeku siromašna, pa je izgaranje potpuno a sadržaj ugljik-monoksida CO manji. Tijekom procesa su i temperature niže, pa je smanjena koncentracija dušikovih oksida.

Potrebno je točno prilagođavanje sustava razvoda promjenljivim uvjetima rada motora. Veće prikrivanje ventila povećava unutrašnju recirkulaciju ispušnog plina, ali nepovoljno djeluje na emisiju ugljikovodika i rad motora pri praznom hodu. U novije se vrijeme razvijaju konstrukcije s promjenljivim razvodom motora, kod kojih se mijenjaju kutovi otvaranja i zatvaranja ventila.

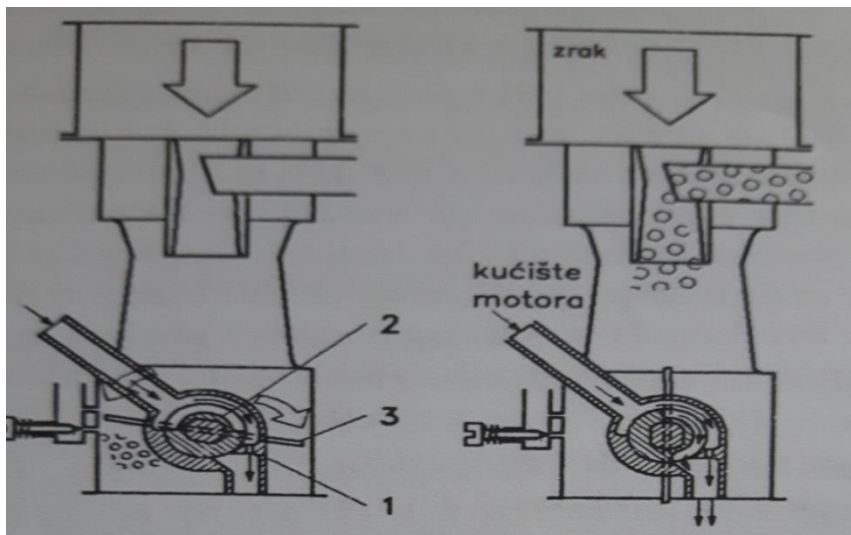
U benzinskim se motorima ograničava veličina stupnja kompresije, što povoljno djeluje na sniženje temperature u cilindru i emisiju dušikovih oksida.

#### 4.2. Smanjivanje štetne emisije provodi se:

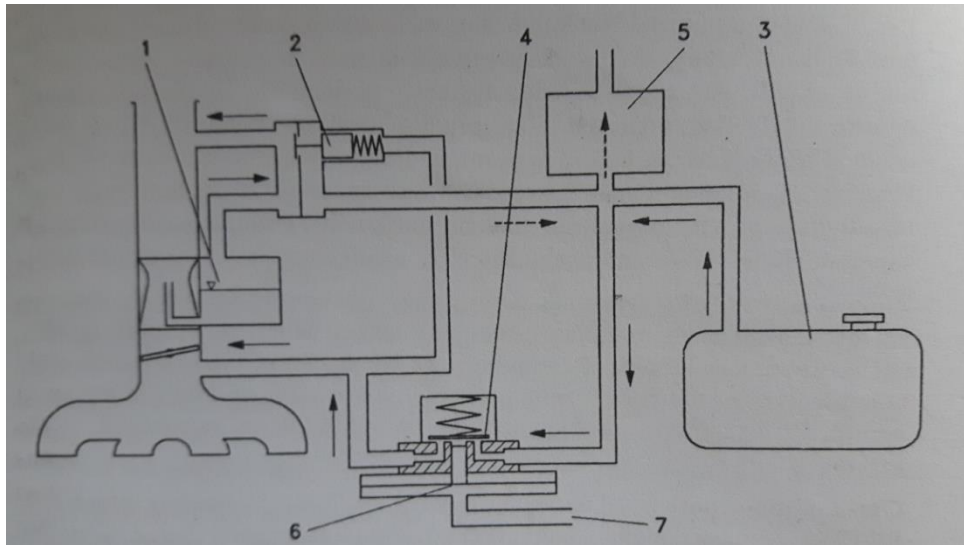
- optimiranjem procesa izgaranja u cilindru motora poboljšanjima na samom motoru (oblik prostora izgaranja, strujanje u cilindru, raspršivanje goriva, ...); to je smanjivanje tzv. sirove emisije
- pročišćavanjem ispušnih plinova nakon što su izašli iz motora
- stalnim poboljšavanjem kvalitete goriva: smanjivanjem sadržaja sumpora u Diesel gorivu i benzinu te primjenom ekološki pogodnijih goriva, npr. Plinovitih
- smanjivanjem otpora vožnje vozila: smanjivanjem otpora zraka i mase vozila, optimiranim upravljanjem radom pomoćnih uređaja motora i vozila itd.

Za smanjenje emisije ugljikovodika nužno je provesti kontrolirano odzračivanje kućišta motora. Pare neizgorjelih ugljikovodika odvođe se iz kućišta motora u usisnu cijev i cilindra, gdje izgaraju. U načelu se pare iz kućišta motora dovode u područje pročištača za zrak, gdje je podtlak relativno malen, ili u područje rasplinjača iza zaklopke s velikim podtlakom. U tom primjeru potrebno je osigurati kontrolu učina odzračivanja. Jedna od izvedaba kod Fiatovih motora prikazana je na slici 12. Dok je zaklopka (3) pritisnuta, punjenje cilindra je malo, a podtlak iza zaklopke visok. Odzračivanje kućišta motora kroz mali otvor u dijelu (1) smanjeno je, pa pare ugljikovodika previše ne obogaćuju smjesu koja ulazi u cilindar. Pri maksimalnom opterećenju motora, uz veliko punjenje cilindra, i odzračivanje kućišta motora je povećano, zahvaljujući većem presjeku strujanja para iz kućišta motora u žlijebu izvedenom na osovini (2).

**Slika 12.** Odzračivanje kućišta motora



**Slika 13.** Odzračivanje spremnika i rasplinjača



Također radi smanjenja emisije ugljikovodika potrebno je spriječiti izlaz isparenog goriva iz rasplinjača i spremnika u okoliš. Odgovarajući uređaji za vrijeme mirovanja motora vode pare goriva iz komore plovka (1) i spremnika (3) (označeno na slici 13.) preko aktivnog ugljena, koji prihvaća benzinske pare u balansnu posudu (5). Pri radu motora ventili vode pare goriva iz balansne posude preko aktivnog ugljena, koji se tada obnavlja, u usisnu cijev, kako je označeno na slici. Tada se ispušni plin s povišenim tlakom dovodi preko cijevi (7), djeluje na membranu (6) te preko potiskivača podiže ventil (4) i otvara prolaz parama goriva iz balansne posude i spremnika. Pritom se rasplinjač odzračava izravno u usisnu cijev, jer je ventil (2) zatvoren, zbog niskog tlaka iza zaklopke.

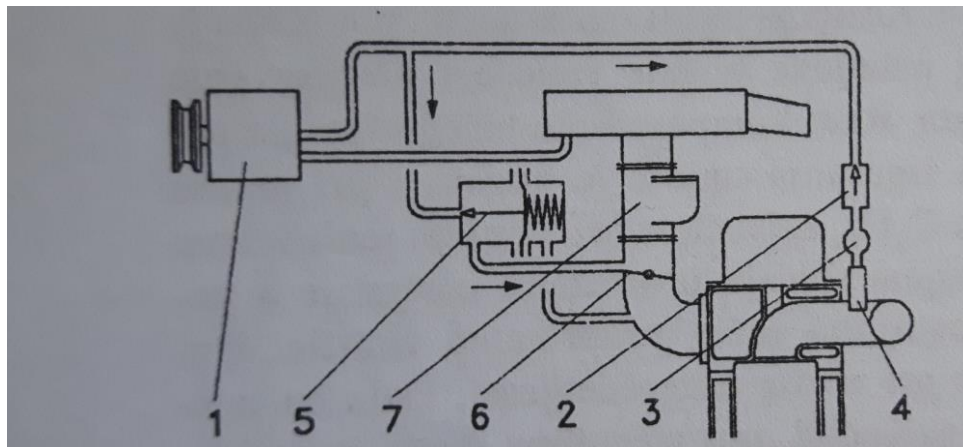
#### **4.2.1. Pročišćavanje ispušnog plina**

Boli sastav ispušnog plina može se postići i djelovanjem na ispušni plin nakon njegovog izlaza iz cilindra. Dakako prednost imaju prije navedene mjere koje sprečavaju nastanak otrovnih sastojaka u većim koncentracijama. Naknadna obrada ispušnog plina provodi se stoga kao dopunska mjera kako bi se zadovoljili strogi propisi.

#### 4.2.2. Dovod zraka iza ispušnog ventila

Nakon izlaska iz cilindra ispušnom se plinu dovodi odmjerena količina zraka, što uzrokuje oksidaciju ugljik-monoksida CO i ugljikovodika  $C_nH_m$ . Oksidacija tih sastojaka moguća je pri visokim temperaturama, pa se zrak dovodi neposredno iza ventila, a taj je dio poželjno toplinski izolirati. Jedna od izvedaba shematski je prikazana na slici 14. Potrebnu količinu dodatnog zraka osigurava crpka (1), koja preko jednosmjernog ventila (2), razvodnika (3) i sapnice (4) upuhava zrak u ispušnu cijev neposredno iza ispušnog ventila. Količina dodatnog zraka ne smije biti velika, kako se temperatura plinova ne bi znatnije smanjila, pa se protok zraka mora kontrolirati. Pri djelomičnom opterećenju, s pritvorenom zaklopkom (6), punjenje motora je manje, pa se dovod dodatnog zraka smanjuju ventilom (5), koji propušta dio zraka u usisnu cijev. Tada na membranu ventila djeluje povišeni podtlak iza zaklopke.

Slika 14. Dovod zraka iza ispušnog ventila



#### 4.3. Mjerenje sastava ispušnog plina i propisi

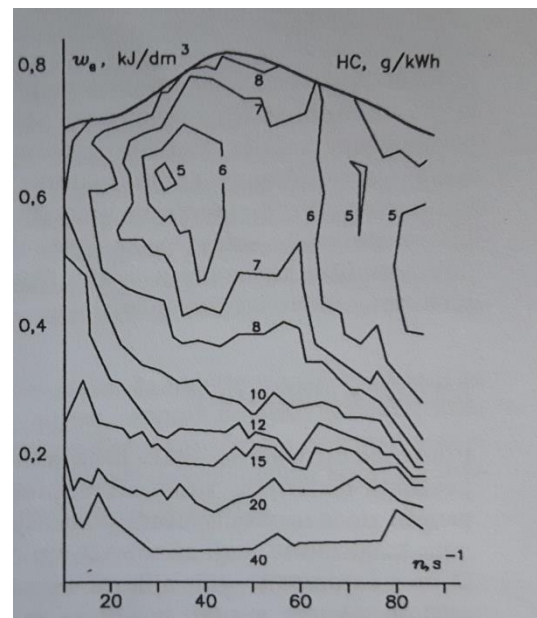
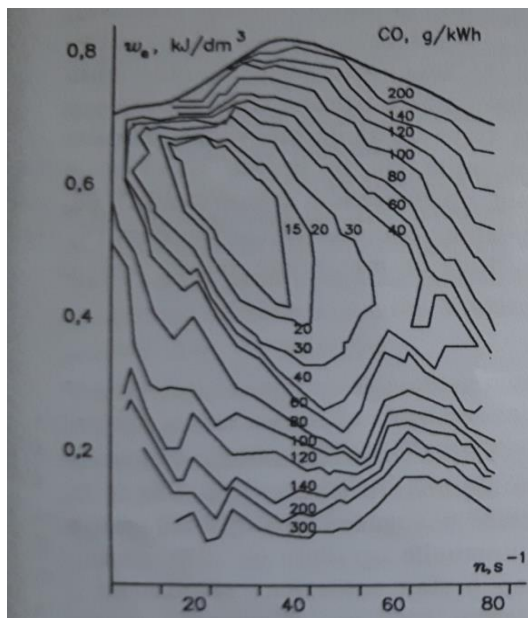
##### 4.3.1. Promjena režima rada motora

Režim rada motora najčešće je vrlo promjenjiv i ima značaj slučajne pojave, što znatno otežava mjerenje sadržaja otrovnih sastojaka u ispušnom plinu, i utvrđivanje stupnja onečišćenja okoliša, npr. koje uzrokuju automobili. Stoga određivanje sadržaja ispušnog plina kod nazivnih karakteristika motora nije dovoljno.

Količine pojedinih otrovnih sastojaka u ispuhu pri različitim režimima rada za jedan automobilski motor prikazane su na slikama 15. i 16. Količina ugljik-monoksida povećana je zbog primjene bogate smjese pa je radi kompenzacije zaostalih produkata izgaranja smjesa bogata i pri malim opterećenjima. Sadržaj ugljikovodika  $C_nH_m$  najveći je pri manjim brzinama vrtnje zbog čega je otežano izgaranje a povećano ispiranje cilindra. Dušikovih oksida općenito, ima najviše pri većim opterećenjima, kada su temperature najviše, a nešto manje pri najvećim opterećenjima, kada je smjesa bogata a sadržaj kisika manji.

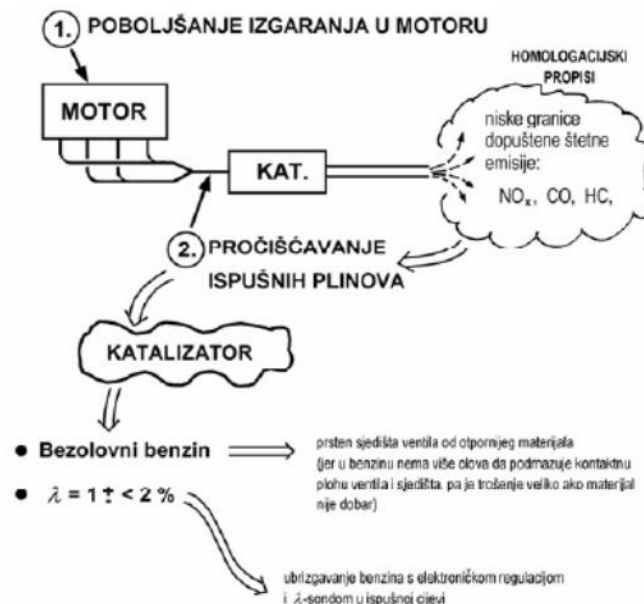
**Slika 15.** Promjena količine ugljik-monoksida

**Slika 16.** Promjene količine ugljikovodika



#### 4.4. Mjere za smanjivanje štetne emisije Otto motora

**Slika 17.** Mjere za smanjivanje štetne emisije Otto motora vezane uz sam motor i uz pročišćavanje ispušnih plinova: niska emisija zahtijeva katalizator, katalizator zahtijeva bezolovni benzin i strogo stehiometrijsku smjesu goriva i zraka



Dopuštene su granice pak toliko niske da se danas mogu dostići jedino primjenom trokomponentnog katalizatora koji smanjuje 3 otrovne komponente u ispušnim plinovima: NO<sub>x</sub>, CO i HC. Katalizatori za pročišćavanje ispušnih plinova Otto motora počeli su se po prvi puta primijenjivati u Los Angelesu u Kaliforniji, gdje je zagađenost zraka poprimila razmjere katastrofe pa je 1960. godine započela kampanja koja je rezultirala tada najstrožim propisima o čistoći ispušnih plinova.

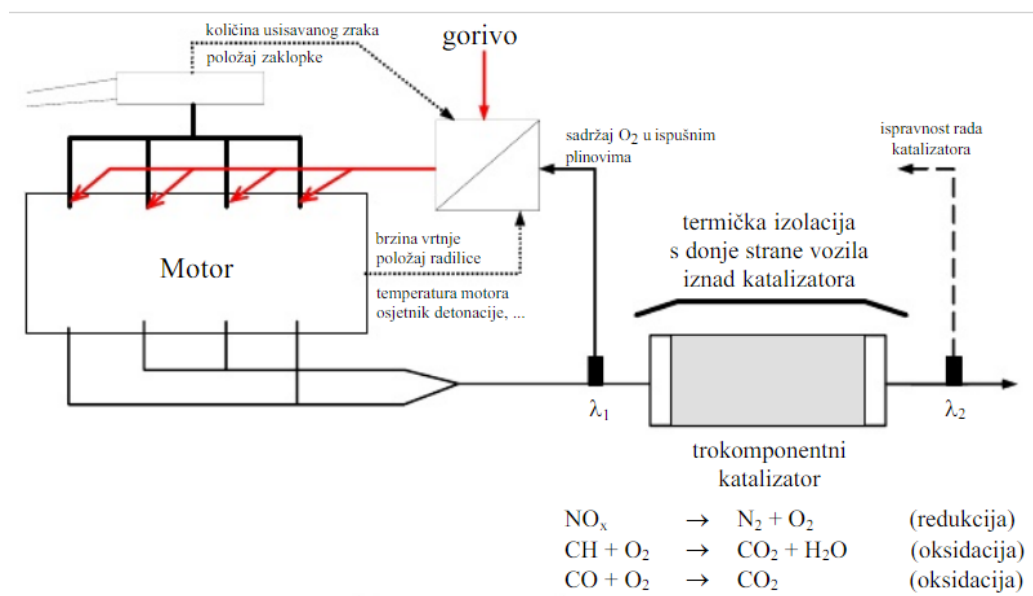
**Da bi katalizator dobro funkcionirao trebaju biti zadovoljeni ovi uvjeti (slika 17.):**

1. motorno gorivo ne smije sadržavati olova (ono se nataloži na aktivni sloj u katalizatoru i tako ga blokira)
2. za visok stupanj pretvorbe u katalizatoru, goriva smjesa mora biti strogo stehiometrijska, što se može postići jedino precizno reguliranim ubrizgavanjem goriva i mjerenjem protoka zraka, odnosno primjenom elektroničkih uređaja za upravljanje radom motora.



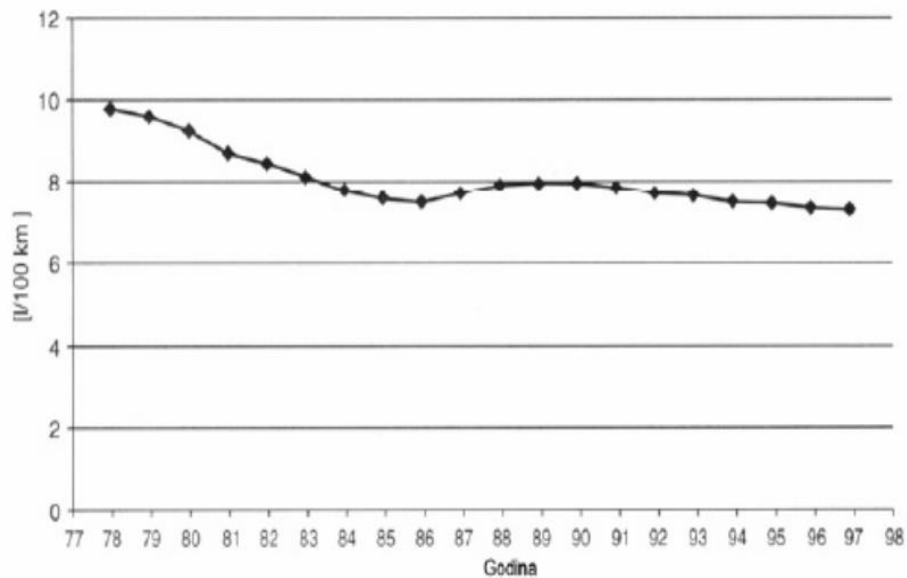
3. za visok stupanj pretvorbe katalizator treba biti zagrijan na visoku temperaturu (preko 600°C; zato se postavlja što bliže motoru)

**Slika 18.** Shema Otto motora s elektronički reguliranim ubrizgavanjem goriva i trokomponentnim katalizatorom. Kod oksidacije se proizvodi toplina pa se katalizator jako zagrijava te na vozilu iznad katalizatora mora biti postavljena toplinska zaštita

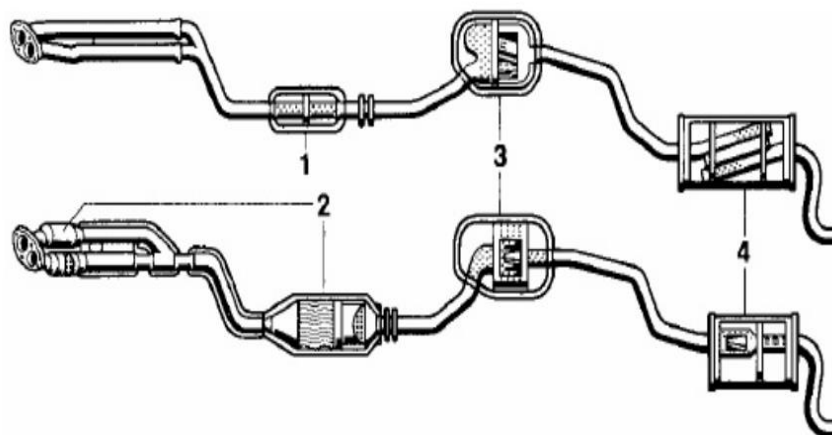


Kada se početkom 1980-ih godina u Europi počeo koristiti bezolovni benzin, njegov je oktanski broj bio manji (oko 90) od oktanskoga broja tadašnjeg olovnog benzina (98 ... 102). Zbog toga je kompresijski omjer motora s katalizatorom prilično dugo bio manji ( $\epsilon \approx 9$ ) od motora bez katalizatora pogonjenih olovnim benzinom ( $\epsilon \approx 10 \dots 11$ ). Tek su u drugoj polovici zadnjega desetljeća dvadesetoga stoljeća Otto motori dostigli a danas i prestigli ( $\epsilon = 12.5$  i više) najviše vrijednosti kompresijskog omjera iz doba olovnoga benzina.

**Slika 19.** Potrošnja goriva kompletne proizvodnje vozila u Njemačkoj krajem dvadesetoga stoljeća. Povećanje koje je nastupilo sredinom 1980-ih godina posljedica je uvođenja bezolovnoga benzina koji je tada imao znatno niži oktanski broj od olovnoga.

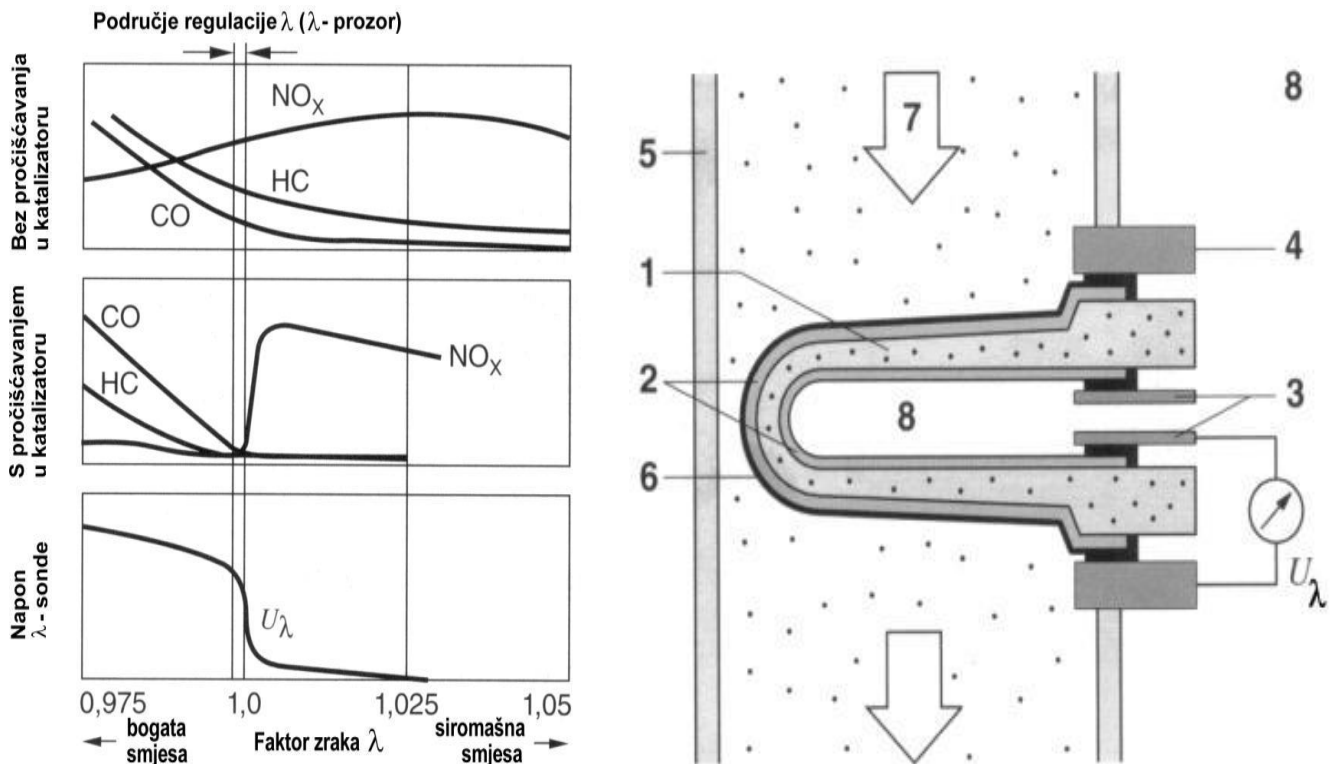


**Slika 20.** Ispušni uređaj Otto motora u automobilu bez katalizatora (gore) i s katalizatorom (dolje): 1- pretprigušivač zvuka, 2 – katalizatori, 3 – prigušivač , 4 – prigušivač



#### 4.4.1. Lambda sonda

**Slika 21.** Utjecaj faktora zraka  $\lambda$  na štetnu emisiju ispušnih plinova (CO, HC, NO<sub>x</sub>) bez i s katalizatorom i napon ( $U_\lambda$ ) lambda sonde lijevo), te shematski presjek lambda sonde (desno)



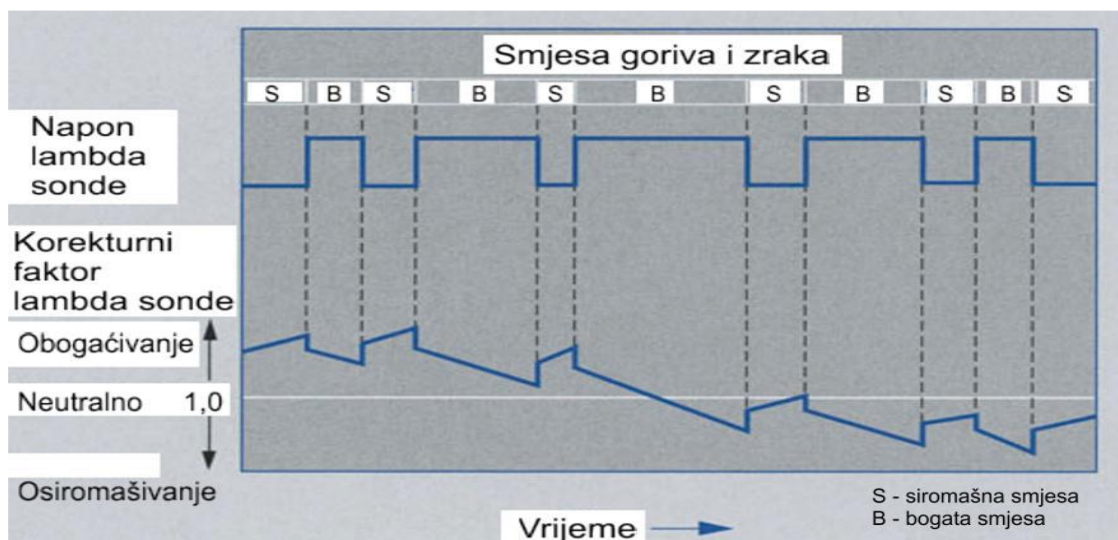
Djelovanje: Lambda sonda je ugrađena u ispušnu cijev (5) i njena vanjska strana je izložena ispušnim plinovima (7) a unutarnja okolnom zraku (8) koji ulazi u šupljinu sonde. Porozno tijelo od posebne keramike (1) (cirkonijev oksid) postaje iznad 350°C vodljivo za ione kisika. Na njegovim vanjskim stranama su elektrode (2), a strana izložena vrućim ispušnim plinovima je zaštićena poroznim keramičkim slojem (6). Ukoliko je sadržaj kisika u ispušnoj cijevi i u okolnom zraku različit, između elektroda (2) spojenih na kontakte (3) i (4) počinju teći ioni kisika i nastaje električni napon ( $U_\lambda$ ). Npr. kod  $\lambda = 0.95$  u ispušnim plinovima ima oko 0.2 do 0.3 % vol. kisika. Lambda sonda ima u uskom području ( $\lambda$ -prozor) skokovitu naponsku karakteristiku koja se koristi kao regulacijska veličina (kod  $\lambda < 1$  napon iznosi 800... 1000 mV, kod  $\lambda > 1$  napon opadne na približno 100 mV).

Na taj način sonda signalizira regulacijskom uređaju je li u ispušnim plinovima previše ili premalo kisika, te se sukladno tome mijenja količina ubrizgavanoga goriva.

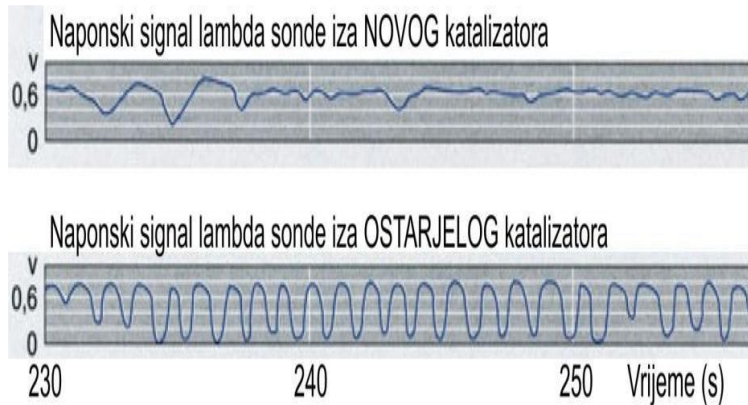
**Slika 22.** Izgled lambda sonde



**Slika 23.** Idealizirani signal uskopojasne lambda sonde ispred katalizatora i korigiranje bogatstva smjese



**Slika 24.** Naponski signali lambda sonde iza novog i istrošenog (ostarjelog) katalizatora. (Upaljena kontrolna svjetiljka na instrumentoj ploči automobila signalizira neispravnost sustava za pročišćavanje ispušnih plinova)



Kontrolna svjetiljka:

**NE SVIJETLI**

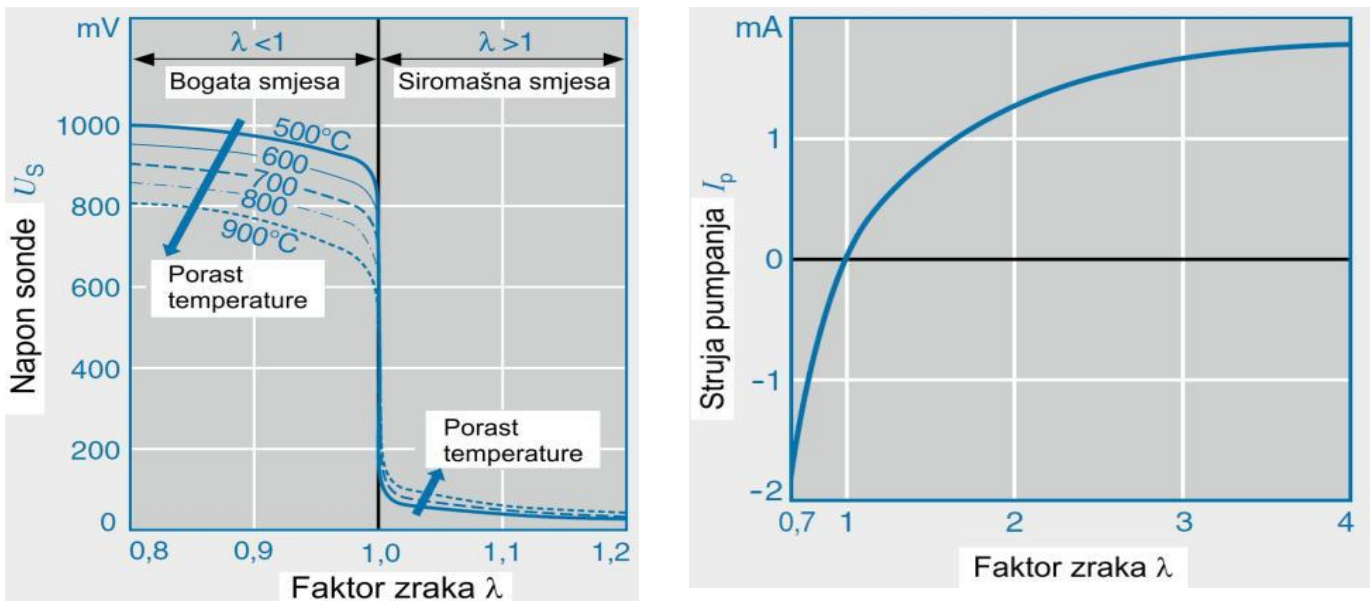
**SVIJETLI**

Impulsi u regulacijskom krugu lambda sonde dovode do promjena sadržaja kisika u ispušnim plinovima. Te se promjene prigušuju ulazom i izlazom kisika iz aktivnog sloja u katalizatoru, koji služi kao spremnik. Kod novog katalizatora je kapacitet pohranjivanja kisika velik pa su amplitude oscilacija napona lambda sonde iz katalizatora vrlo male (gornji dijagram). Međutim, kod ostarjelog (istrošenog) katalizatora je smanjen kapacitet pohranjivanja kisika pa naponski signal stalno varira velikim amplitudama između dva ekstrema jer u katalizatoru ne može doći do prigušenja (donji dijagram).

#### 4.4.2. Širokopolasna i uskopolasna lambda sonda

U suvremenim uređajima za pročišćavanje ispušnih plinova primjenjuju se dva tipa lambda-sonde: uskopolasna (njem. *Zweipunkt-Lambda-Sonde*) i širokopolasna (njem. *Breitband-Lambda-Sonde*). Uskopolasna sonda daje naponski izrazito skokovit signal koji kod bogate smjese ima oko 900 mV a kod siromašne oko 100 mV. Taj signal omogućuje samo detektiranje bogate, odnosno siromašne smjese. Kad primi signal od 900 mV, upravljačko računalo odmah smanjuje količinu ubrizgavanoga goriva i osiromašuje smjesu, a kod signala od 100 mV povećava količinu goriva i obogaćuje smjesu. Naponski signal lambda sonde u vremenu stalno oscilira između ove dvije vrijednosti, a faktor zraka  $\lambda$  također oscilira u uskom "lambda prozoru" između vrijednosti 0,995 i 1,005 kod novog motora.

**Slika 25.** Signal uskopojasne (lijevo) i širokopojasne lambda-sonde (desno)



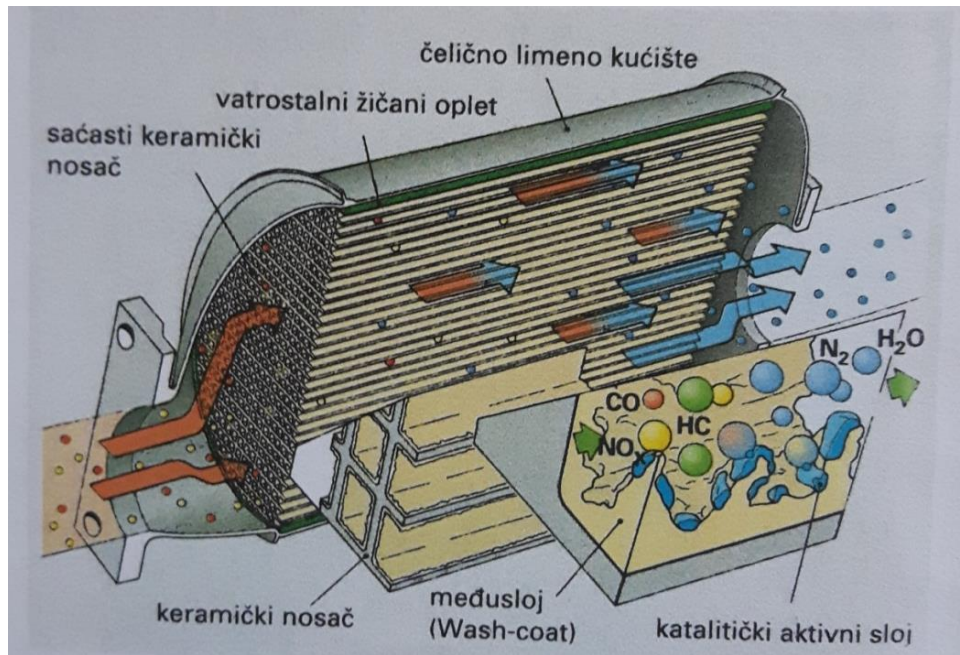
#### 4.4.3. Katalizator

Osnovni dijelovi katalizatora (slika 26.) su:

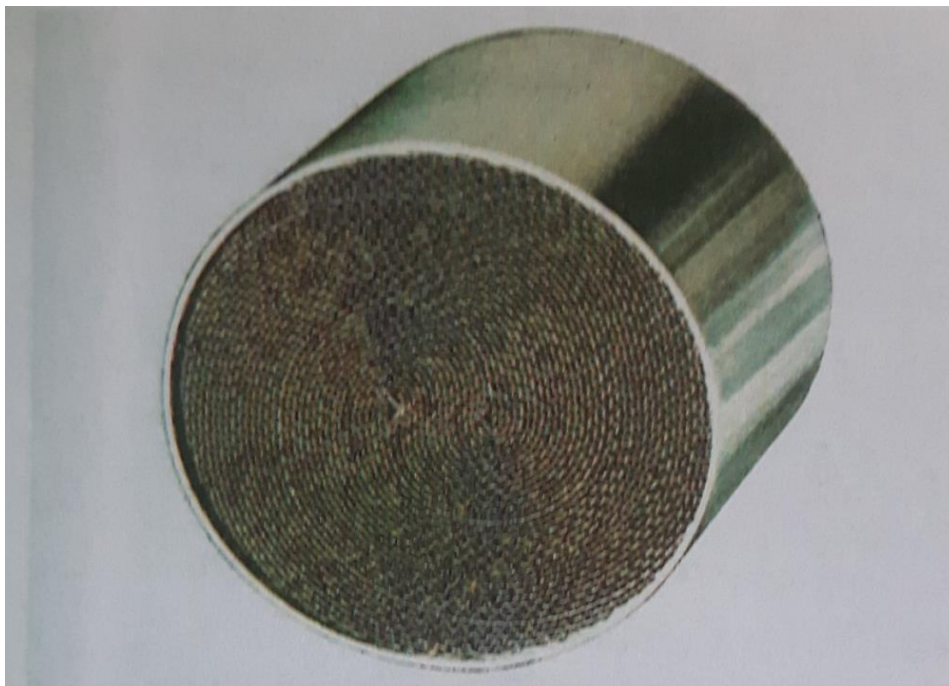
- keramički ili metalni nosač
- međusloj (wash-coat) ili noseći sloj (samo kod keramičkog nosača)
- katalitički aktivni sloj

Nosač čine više tisuća sitnih kanalića kroz koje struje ispušni plinovi. Kanalići kod keramičkog nosača prevučeni su vrlo poroznim međuslojem, čime se aktivna površina povećava približno 7000 puta. Na međusloj je neparivanjem nanesen aktivni sloj (platina, rodij i paladij, u količini od 2 g).

**Slika 26.** Konstrukcija i princip rada keramičkog katalizatora



**Slika 27.** Katalizator s metalnim nosačem

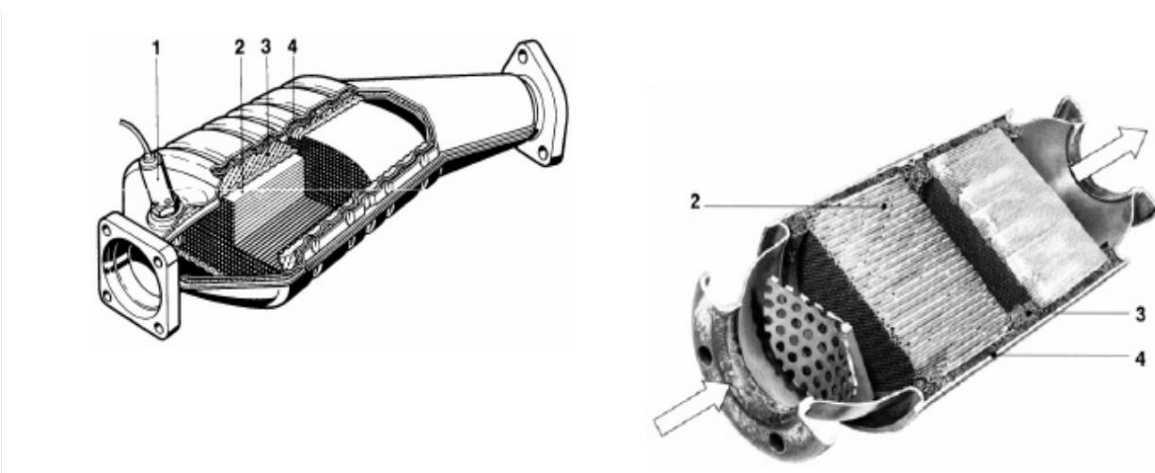


Obilježja katalizatora s keramičkim nosačem:

- plemeniti metali znatno se lakše recikliraju
- konstantna radna temperatura
- jeftiniji u radnom vijeku
- vrlo osjetljiv na udarce i vibracije
- manja temperaturna stabilnost
- duže vrijeme zagrijavanja
- veći protutlak u ispuhu i stoga manja snaga motora

#### 4.4.4. Trokomponentni katalizator

**Slika 28.** Trokomponentni katalizator s dva uloška: 1 – lambda sonda, 2 – keramički uložak (katalizator), 3 – žičano uležištenje, 4 – kućište katalizatora (najčešće od dvostrukog lima radi nužne toplinske zaštite vozila od vrućeg katalizatora)



Trokomponentni katalizator. Smanjenje sumpora s 50 na 10 mg/kg dovodi do povećanja trajnosti komponenata relevantnih za smanjenje štetne emisije, posebno kod koncepta ULEV (Ultra Low Emission Vehicle). Zbog toga je potrebno manje dodatno zagrijavanje katalizatora što ima za posljedicu smanjenje potrošnje goriva (katalizator se zagrijava povećanjem temperature ispušnih plinova, uslijed izgaranja male količine goriva ubrizgane u cilindar pri kraju takta ekspanzije).



Trokomponentni katalizator ima oblik ispušnog lonca u kome se nalazi saćasti uložak prevučen katalizatorom tj. plemenitim metalom (platinom ili legurom platine i rodija). Katalizator smanjuje tri štetne komponente u ispušnim plinovima: reducira NO<sub>x</sub> i dogorijeva CO i HC. To funkcioniše samo u tzv. lambda prozoru, odnosno ako je faktor zraka u uskim granicama  $\lambda = 1.00 \pm (<2\%)$ . Ovaj se uvjet ne može postići kod Diesel motora niti kod Otto GDI motora sa siromašnom smjesom. Za postizanje visokog stupnja pretvorbe katalizator treba biti zagrijan na visoku temperaturu od preko 600 °C. Benzin ne smije sadržavati olovo jer ono uništava lambda-sondu i katalizator (prekrije aktivni sloj pa ispušni plinovi ne mogu doći s njim u doticaj).

#### **4.4.5. SCR-katalizator**

SCR-katalizator. Za buduće smanjenje NO<sub>x</sub> potrebni su SCR-katalizatori u kojima se upotrebljava dodatna oksidacijska tvar. Najprikladniji su ugljikovodici, međutim oni su osjetljivi na sadržaj sumpora. Upotreba drugih redukcijskih tvari, npr. amonijaka, opterećena je s još neriješenim problemima poput pohranjivanja u vozilu, sustava za doziranje itd. U usporedbi s drugim konceptima, gorivo bez sumpora ( $S < 10 \text{ mg/kg}$ ) i kombinacija oksidacijskog i SCR-katalizatora pružaju najveće prednosti.

#### **4.4.6. Apsorpcijski katalizator**

Apsorpcijski katalizator za smanjenje NO<sub>x</sub> sadrži pločice olova (Pb) koje upija NO i pločice barijevog oksida (BaO) koji upija NO<sub>2</sub>. Ovako upijeni dušikovi oksidi se reduciraju pomoću HC, CO i H<sub>2</sub> u ispušnim plinovima. Zbog toga se u procesu regeneracije dodatnim obogaćivanjem smjese u cilindru u taktu ekspanzije namjerno izaziva nepotpuno izgaranje, da bi ispušni plinovi sadržavali dovoljno ovih sastojaka. Pored toga, sumpor u gorivu izgara u SO<sub>2</sub> i SO<sub>3</sub> a oni uništavaju katalizator. Za visoki stupanj pretvorbe apsorpcijski katalizator treba biti zagrijan na preko 600°C.

Prednosti goriva bez sumpora ( $S < 10 \text{ mg/kg}$ ):

- **povećana djelotvornost oksidacijskog katalizatora** (CO, HC), mogućnost uporabe SCR-katalizatora ( $\text{NO}_x$ ) kod Otto motora i **filtra** za čestice;
- **manja emisija** HC,  $\text{NO}_x$  i CO, a neizravno i emisija  $\text{CO}_2$  jer se donekle **smanjuje potrošnja goriva** zbog smanjene potrebe za regeneracijom katalizatora
- **manja emisija čestica** (sumpor se pretvara u sulfate, a oni u čestice)
- **znatno veća trajnost** uređaja za pročišćavanje ispušnih plinova.

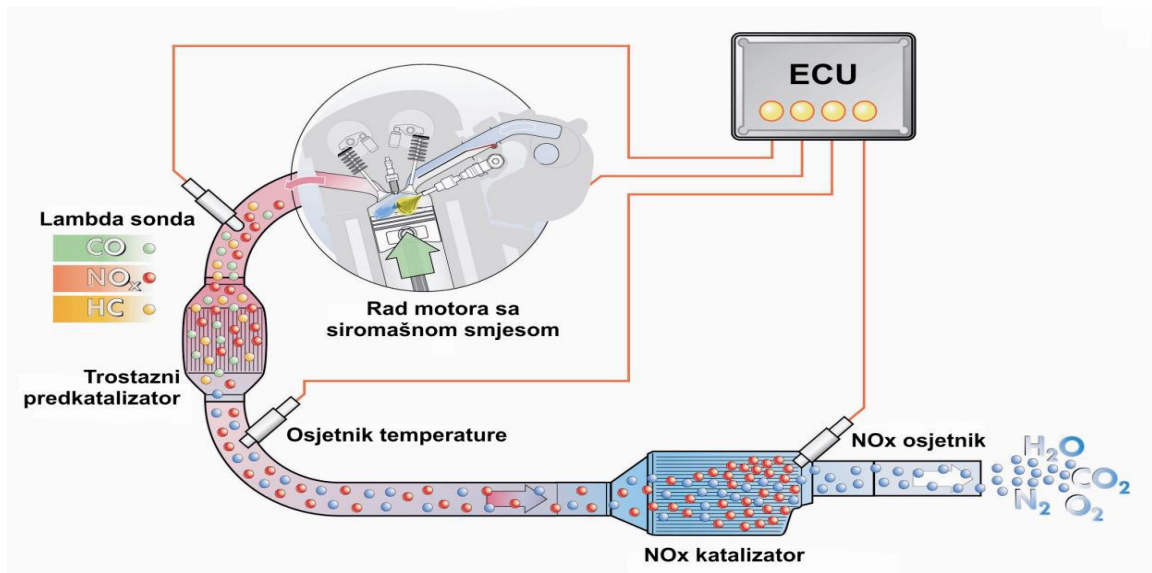
U **benzinskom motoru** smanjenje sumpora sa 150 na 10 mg/kg smanjuje emisije štetnih tvari do 35 %. bez ikakvih dodatnih zahvata na motoru. Primjena novih, toplinski otpornijih trokomponentnih katalizatora također nije moguća jer visoki sadržaj sumpora od 150 mg/kg razara katalizator.

## 4.5. Motori s vanjskim izvorom paljenja

### 4.5.1. Apsorpcijski katalizator za $\text{NO}_x$

Apsorpcijski katalizator se ugrađuje u motore koji imaju izravno ubrizgavanje goriva i rade sa siromašnom smjesom. Primjenjuje se u kombinaciji s trokomponentnim katalizatorom.

**Slika 29.** Shema sustava za pročišćavanje ispušnih plinova Otto motora sa siromašnom smjesom: dva katalizatora, trokomponentni i apsorpcijski, i dvije lambda sonde. Prva, širokopojasna lambda sonda regulira omjer goriva i zraka za izgaranje, a druga, uskopojasna, nadgleda rad oba katalizatora



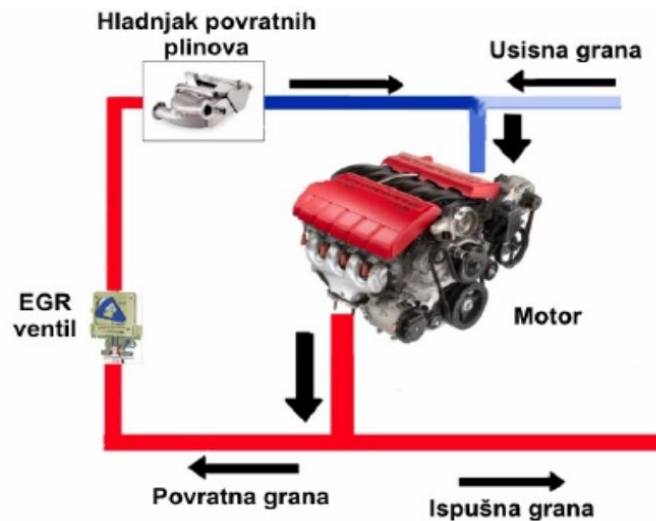
Čak i minimalni sadržaj sumpora smanjuje stupanj pretvorbe u apsorpcijskom NO<sub>x</sub> - katalizatoru. Zbog toga je potrebno češće regeneriranje, a to povećava potrošnju goriva. Ako se sadržaj sumpora u gorivu smanji s 50 mg/kg na 10 mg/kg, učestalost regeneriranja pada na približno 1/10. Gorivo bez sumpora ( $S < 10 \text{ mg/kg}$ ) je zbog toga nužan preduvjet niske štetne emisije i niske potrošnje goriva tijekom uobičajenog uporabnog vijeka vozila.

Kad motor radi sa stehiometrijskom smjesom, trokomponentni i apsorpcijski katalizator za NO<sub>x</sub> rade kontinuirano tj. ponašaju se kao dva trostazna katalizatora. Međutim, kod rada sa siromašnom smjesom trokomponentni katalizator i dalje oksidira CO i HC, a apsorpcijski preuzima funkciju smanjenja NO<sub>x</sub> u dvije faze. U prvoj fazi NO<sub>x</sub> se pohranjuje u katalizatoru dok se on ne napuni. Zasićenost se detektira mjerenjem temperature ispušnih plinova između trostaznog i apsorpcijskog katalizatora ili mjerenjem sadržaja NO<sub>x</sub> iza apsorpcijskog katalizatora. U drugoj fazi koja nastupa nakon zasićenja vrši se tzv. regeneracija apsorpcijskog katalizatora pri kojoj dolazi do otpuštanja NO<sub>x</sub> i pretvorbe u CO<sub>2</sub> i N<sub>2</sub>. Da bi se to dogodilo upravljačka elektronika motora mora kratkotrajno prebaciti motor na rad s bogatom smjesom ( $\lambda < 0,8$ ) pa u ispušnim plinovima ima viška CO i HC. Oni služe kao redukcijsko sredstvo koje u apsorpcijskom katalizatoru vrši redukciju NO<sub>x</sub> na CO<sub>2</sub> i N<sub>2</sub>. Sposobnost akumuliranja NO<sub>x</sub>-a u ovom tipu katalizatora ovisi o njegovoj temperaturi. Najveća pohrana NO<sub>x</sub>-a postiže se između 300 i 400°C, što znači da je ova temperatura znatno niža od one na kojoj radi trostazni katalizator. Zato se trostazni katalizator postavlja bliže motoru, a apsorpcijski katalizator za NO<sub>x</sub> dalje od motora.

#### **4.5.2. Povrat ispušnih plinova - EGR**

Kod EGR-sustava dio ispušnih plinova (do 20%) iz ispušne grane preusmjerava se putem reguliranog EGR-ventila ponovo u usis. Ispušni plinovi koji se dovode ponovo u cilindar ne sudjeluju u izgaranju, ali troše toplinu da bi se zagrijali. To smanjuje visoke temperature za vrijeme izgaranja u cilindru, koje su glavni uzročnik stvaranja NO<sub>x</sub>. Naime, iako je dušik kod normalnih temperatura inertan, kod vrlo visokih poput ovih koje nastaju u cilindru spaja se s kisikom. EGR je bitan za one Otto motore koji mogu raditi sa siromašnom smjesom jer tada trostazni katalizator ne može smanjivati NO<sub>x</sub>. Na taj način EGR rasterećuje apsorpcijski katalizator za NO<sub>x</sub> i produžava vrijeme između dvije regeneracije. Povećanjem volumena plinova koji ulaze u cilindar za vrijeme usisa smanjuje se potlak u cilindru, a uslijed toga i gubitak rada za izmjenu plinova u cilindru pa se smanjuje potrošnja goriva.

**Slika 30.** Shema motora sa sustavom za povrat ispušnih plinova (EGR)



#### 4.5.3. Sustav sekundarnog zraka

Upuhivanjem sekundarnog zraka u ispušnu cijev, naknadnim se izgaranjem smanjuje koncentracija HC i CO u fazi hladnog starta i zagrijavanje motora. Naime, u ovim režimima katalizator još nije postigao radnu temperaturu.

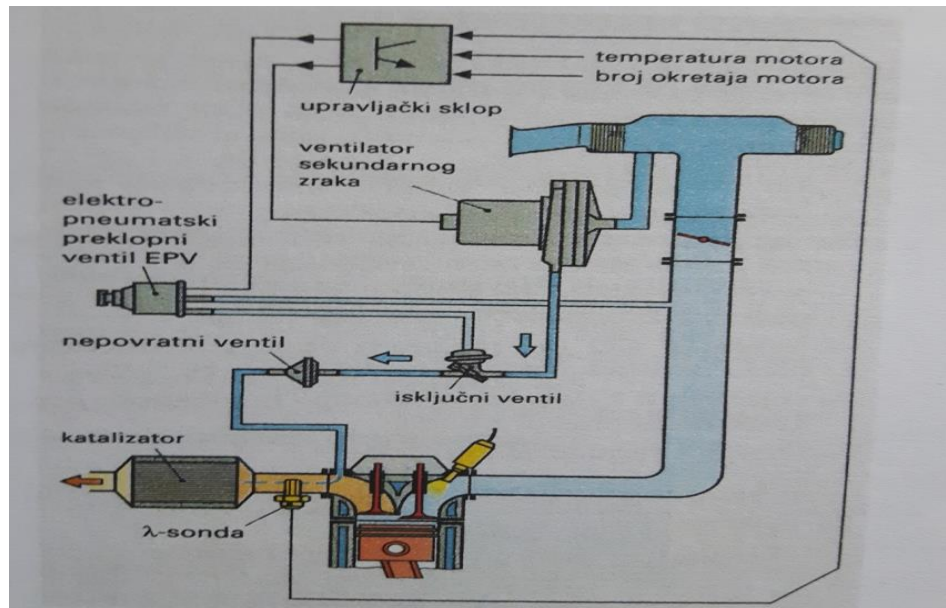
Prednosti:

- nakon hladnog starta katalizator brže djeluje
- katalizator se može ugraditi dalje od motora i tako mu produžiti vijek trajanja

Na slici 31. je primjer sustava s puhaljkom (kompresori s tlakom do 2 bara) sekundarnog zraka pokretanom elektromotorom. U ovisnosti o temperaturi motora, upravljački sklop djeluje na kompresor i elektropneumatski preklopni ventil.

Preko isključenoga i nepovratnog ventila zrak iz kompresora struji u ispuh. Isključni ventil upravljan je EPV-om. Nepovratni ventil sprječava povrat i udar ispušnih plinova u kompresor, te njegovo oštećenje pri pokretanju.

**Slika 31.** Shema sustava sekundarnog zraka



#### 4.6. Sustavi za paljenje smjese

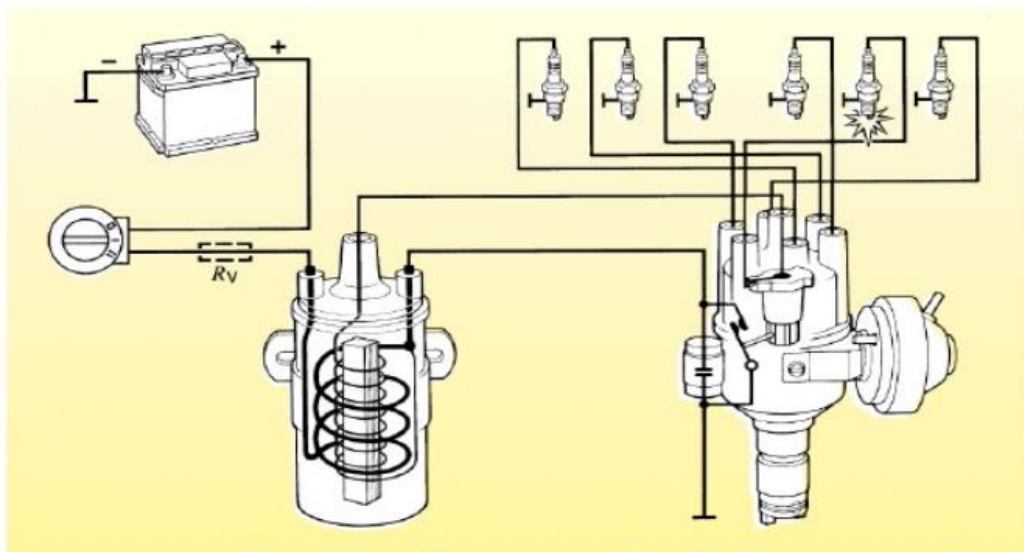
Zadatak sustava za paljenje je da točno u određenom trenutku, prije završetka takta kompresije, zapali sabijenu smjesu u cilindru. Trenutak kada će iskra zapaliti smjesu ovisan je o brzini vrtnje motora (što je brzina vrtnje veća, to je i kut pretpaljenja veći) i opterećenja motora (što je opterećenje veće, kut pretpaljenja mora biti veći). Na ovaj sustav postavljaju se zahtjevi da energija paljenja bude što veća, sadržaj štetnih ispušnih plinova što manji, što manja potrošnja goriva i da se kut pretpaljenja samoprilagođava ako nastupi nekontrolirano izgaranje goriva u motoru.

Sustave za paljenje smjese s obzirom na konstrukcijske značajke sustava, moguće je podijeliti na tri osnovna sustava:

##### 4.6.1. Klasično baterijsko paljenje

Kod klasičnog baterijskog paljenja (slika 32) prekidač struje primara koristi platinsku dugmad. Kut pretpaljenja je određen mehaničkom transmisijom razvodnika, a može se korigirati centrifugalnim regulatorom (ovisno o brzini vrtnje motora) i vakumskim regulatorom (ovisno o opterećenju motora).

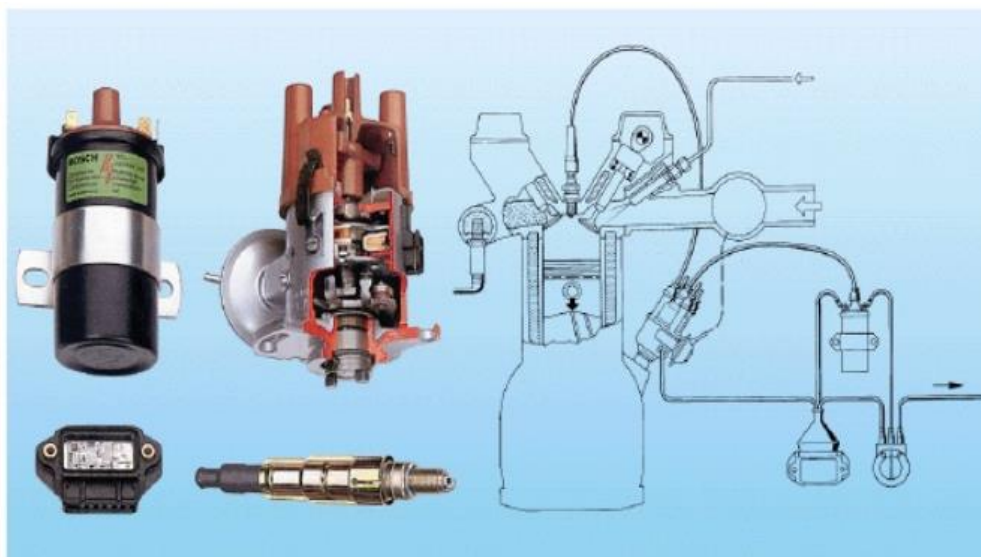
**Slika 32.** Shematski prikaz klasičnoga baterijskog paljenja



#### 4.6.2. Tranzistorsko paljenje

Kod tranzistorskog paljenja (slika 33) kao glavni prekidač struje primara koristi se tranzistor dok se pobuda tranzistora ostvaruje pomoću platinske dugmadi. Prednost ovakvog sustava nad klasičnim baterijskim paljenjem je dulji životni vijek platina s obzirom da se preko njih obavlja prekid relativno malih iznosa struja te povećanje moguće ostvarive energije paljenja.

**Slika 33.** Shematski prikaz i dijelovi tranzistorskoga paljenja

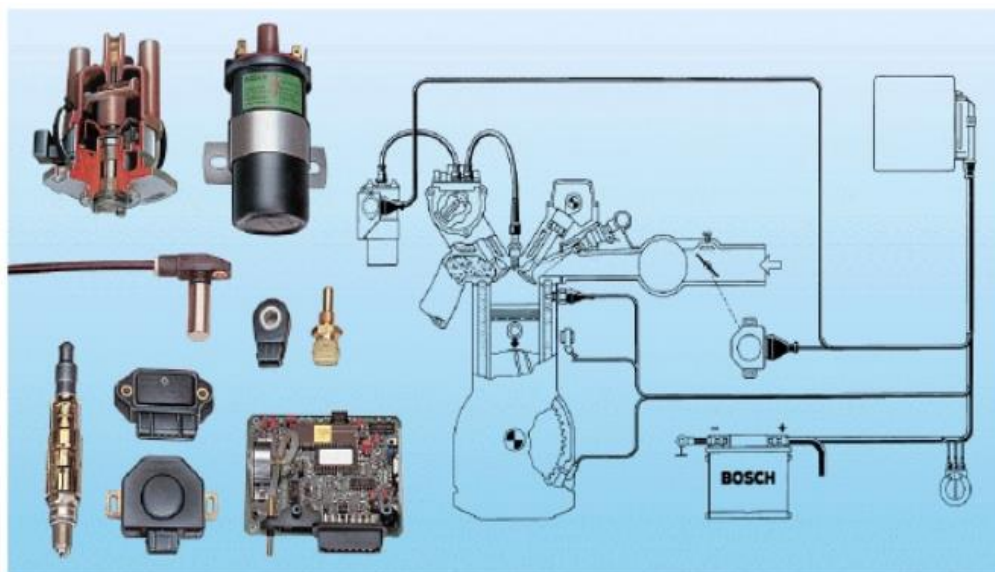


I kod ovog sustava regulacija kuta pretpaljenja u ovisnosti o brzini vrtnje i opterećenju motora izvodi se centrifugalnim i vakumskim regulatorom, a razvod je i nadalje riješen samo mehaničkim putem.

### 4.6.3. Elektroničko paljenje

Elektroničko paljenje je najsavršeniji oblik sustava paljenja smjese, pri čemu se, (slika 34) kao i kod tranzistorskog paljenja, prekidanje struje primara obavlja tranzistorski. Za razliku od klasičnoga baterijskog paljenja ili tranzistorskog paljenja gdje se regulacija kuta pretpaljenja obavlja samo pomoću centrifugalnog i vakumskog regulatora smještenog na razvodniku paljenja, ovdje je regulacija obavlja pomoću računala (ECU).

**Slika 34.** Shematski prikaz i dijelovi elektronskoga paljenja



Računalo sa senzora smještenih po motoru može dobivati sljedeće ulazne obavijesti:

- brzina vrtnje motora i položaj klipova u GMT (gornja mrtva točka)
- tlak u usisnoj grani
- temperatura usisnoga zraka
- temperatura motora
- napon akumulatora
- detonatorsko izgaranje u motoru

Sve dobivene obavijesti se obrađuju i kao rezultat se dobiva korigirani kut pretpaljenja za svako radno stanje motora.



## 5. ZAKLJUČAK

Zagađenje okoliša uzrokovano štetnim ispušnim plinovima jako je velik problem u cijelome svijetu. Razni štetni spojevi kao što su ugljikov dioksid i monoksid, dušični oksidi i ugljikovodici, loše utječu na ljudsko zdravlje i biljni svijet. Najočigledniji utjecaj onečišćenog zraka na ljudsko zdravlje su bolesti dišnih organa. Stoga se razvojem zakonske regulative u području vozila koja je započela krajem 50-ih i početkom 60-ih godina u SAD-u, Japanu i Europi želi postići smanjenje rasta štetnih plinova ili ih barem spustiti na neku zadovoljavajuću razinu.

Osnovni cilj stvaranja pravilnika je donošenje jedinstvenih propisa za proizvodnju vozila, koji kao konačnu posljedicu imaju jedinstvene metode ispitivanja, odnosno provjere da li vozila zaista zadovoljavaju propisane zahtjeve. Ispitivanja vrše ovlaštene laboratoriji širom Europe a rezultati ispitivanja se priznaju u svim zemljama koje su prihvatile Sporazum. Na taj je način olakšana trgovina između tih zemalja, jer ispitivanja ne treba ponavljati u zemlji koja uvozi vozila.

Konkretni primjeri na Otto motoru za najefektivnije smanjenje postiže se upotrebom katalizatora koji je najbitniji dio ispušnog sustava, a koji se koristi za smanjenje štetnih plinova. Njegova osnovna zadaća je da ugljikovodike, dušične okside i ugljikov monoksid pretvara u manje štetne plinove vodenu paru, dušik i ugljikov dioksid. Smanjenja koja se mogu postići uporabom katalizatora iznose čak 90% ovisno o prilagođenosti regulacijskog kruga u kojem sudjeluju centralno računalo i lambda sonda. Povratom ispušnih plinova - EGR dio ispušnih plinova (do 20%) iz ispušne grane preusmjerava se putem reguliranog EGR-ventila ponovo u usis. Na taj način smanjuju se visoke temperature za vrijeme izgaranja u cilindru, koje su glavni uzročnik stvaranja NO<sub>x</sub>.

Samo daljnjim osvješćivanjem ljudi i provođenjem sve strožih zakonskih regulativa može se postići smanjenje emisije štetnih ispušnih plinova i čestica, onečišćenog zraka i zagađenja okoliša.

## LITERTURA

1. -, Tehnika motornih vozila, Hrvatska obrtnička komora i Pučko otvoreno učilište, Zagreb, 2005.
2. I. Mahalec, Z. Lulić, D. Kozarac: Motori SUI (Skripta) , Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
3. D. Jeras: Klipni motori-Uređaji, Školska knjiga, Zagreb, 1991.
4. Z. Kalauz: Ispitivanje ispušnih plinova motornih vozila- EKO test, Centar za vozla Hrvatske, Zagreb, 2004.
5. Z. Kalauz: *EKO test*, Stručni bilten br. 87, Centar za vozila Hrvatske, Zagreb, 2000.
6. E. Bazijanac, A. Domitrović: Emisija ispušnih plinova (skripta), Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2017.