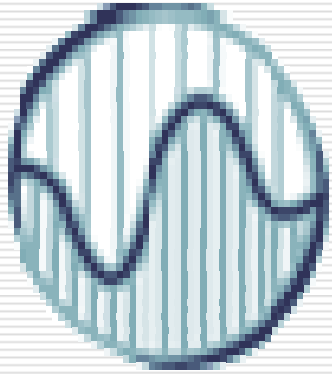




Висока школа електротехнике и
рачунарства струковних студија

ИЗДУВНИ СИСТЕМ



Издувни систем и емисија штетних материја

□ Намена:

- Одвођење и пречишћавање продуката сагоревања из мотора у атмосферу
- Пригушење буке

□ *Продукти потпуног сагоревања угљоводоничних горива*: вода и угљен-диоксид

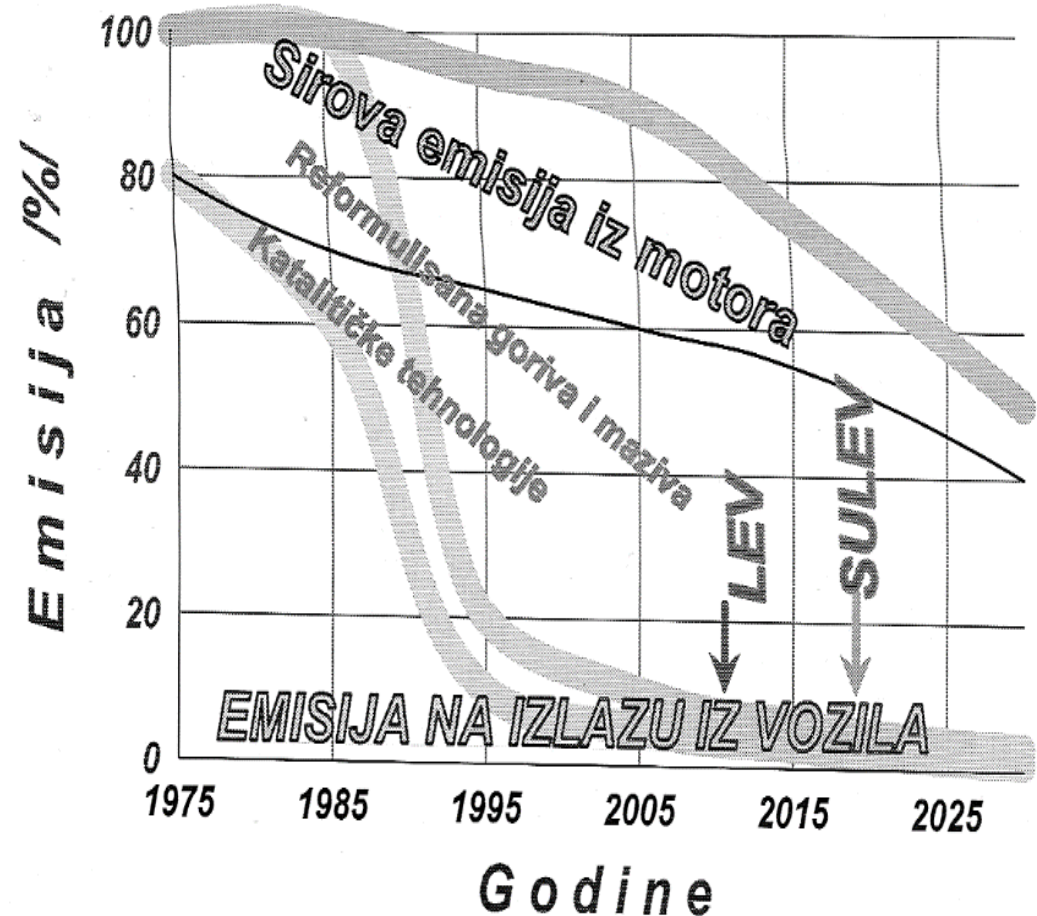
□ *Продукти непотпуног сагоревања*

- Несагорели угљоводоници (НС): најчешће канцерогено дејство
- Оксиди азота (NO_x): азот диоксид изазива едем плућа, ...
- Угљен-моноксид (CO): смањује проток кисеоника кроз крвоток
- Честице: потичу од несагорелог угљеника (загађивачи због тога што упијају различита једињења из горива и мазива, првенствено полицикличне угљоводонике)
- Угљен диоксид (CO_2): директно не утиче на здравље, али доприноси изазивању ефекта стаклене баште
- Оксиди сумпора: могу да изазову многобројна штетна дејства, доприносе појави киселих киша
- Озон: може да изазове штетне последице у нижим слојевима атмосфере, интензивније се ствара у присуству угљоводоника и оксида азота



Амерички прописи о емисији

- Федерални: EPA (Environmental Protecting Agency)
- Калифорнија: ARB (Air Resources Board)
- Стандарди:
 - Tier 1, Tier 2, LEV, ...

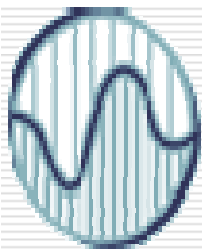




Увођење амандмана за чист ваздух

Uvođenje u (%)	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	9	10
Izduvna emisija																
Tier I	40	80	100													
Standard za CO pri niskim temp.	40	80	100													
Tier II										40		60		80		100
NLEV										40		60		80		100
Emisija isparenja																
Enh. EVAP USA		20	40	90	100											
Enh. EVAP Kalifornija	10	30	50	100												
ORVR				40	80	100										
Ostalo																
OBDII		100														
Čista goriva				100												15 ppm S

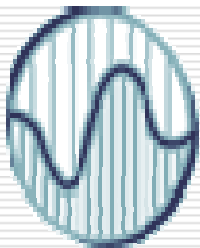
NLEV - National Low Emission Vehicle, **Enh. EVAP**-Enhanced Evaporative Emissions (Strožija emisija isparenja), **ORVR** - On-Board Refueling vapour Recovery (Smanjenje isparenja prilikom punjenja gorivom uz pomoć OBD dijagnostike), **OBDII** – On-bord dijagnostika druge generacije, Zahteva se očuvanje emisije u toku veka vozila. Za putnička vozila 100,000 milja, za teretna vozila 160 000 milja.



Калифорнијски прописи за емисију путничких возила

Kategorija emisije	Vek vozila mi	NMOG	CO	NO _x	Čestice
TLEV	50 000	0.125	3.4	0.4	
	120 000	0.156	4.2	0.6	0.04
LEV	50 000	0.075	3.4	0.05	
	120 000	0.090	4.2	0.07	0.01
ULEV	50 000	0.040	1.7	0.05	
	120 000	0.055	2.1	0.07	0.01
SULEV	120 000	0.010	1.0	0.02	0.01

TLEV= Transitional Low-Emission Vehicle; LEV= Low-Emission Vehicle;
ULEV= Ultra - Low-Emission Vehicle; i SULEV= Super-Ultra- Low-Emission Vehicle,
NMOG= Nemetanski organski gasovi (engl. Non-Methane Organic Gases)



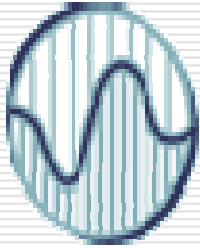
Европски прописи о емисији

- ECE прописи: ECE R15, ECE R83
- EU прописи: директиве (нпр. 91/144 ЕЕС – Euro 1), до Euro 3/4, уредбе/регулативе надаље

Primena 01.januar	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
Putnička vozila do 2.5 t, laki teretni automobili klase I													
Euro 3 emisija	*												
Euro 4 emisija				*									
Euro 5 emisija													
Enh. EVAP.													
EOBD benzin													
EOBD dizel													
Niske temp. benzin													
Vek	80 000 km							100 000 km			160 000		
Veća putnička vozila >2.5 t, laki teretni automobili klase II, III													
Euro 3 emisija	*												
Euro 4 emisija				*									
Euro 5 emisija													
Enh. Evap.													
EOBD benzin													
EOBD dizel													
Niske temp. benzin						*							
Vek	80 000 km							100 000 km			160 000		
Referentna goriva - Sumpor (benzin/dizel)													
Euro 1, 2	400/300 ppm												
Euro 3			100/300 ppm										
Euro 4			*					50/50 ppm					
Euro 5								*				10/10 ppm	
Goriva na tržištu - Sumpor (benzin/dizel)													
Euro 1, 2	500/500 ppm		**										
Euro 3			150/350 ppm					**					
Euro 4			*					50/50 ppm					
Euro 5								*				10/10 ppm	

*Ranija primena se stimuliše poreskom politikom.

**Odobrava se odgovarajuće kašnjenje u primeni novih granica članicama EU kod kojih bi ranija primena mogla da dovede do socijalnih i ekonomskih problema.

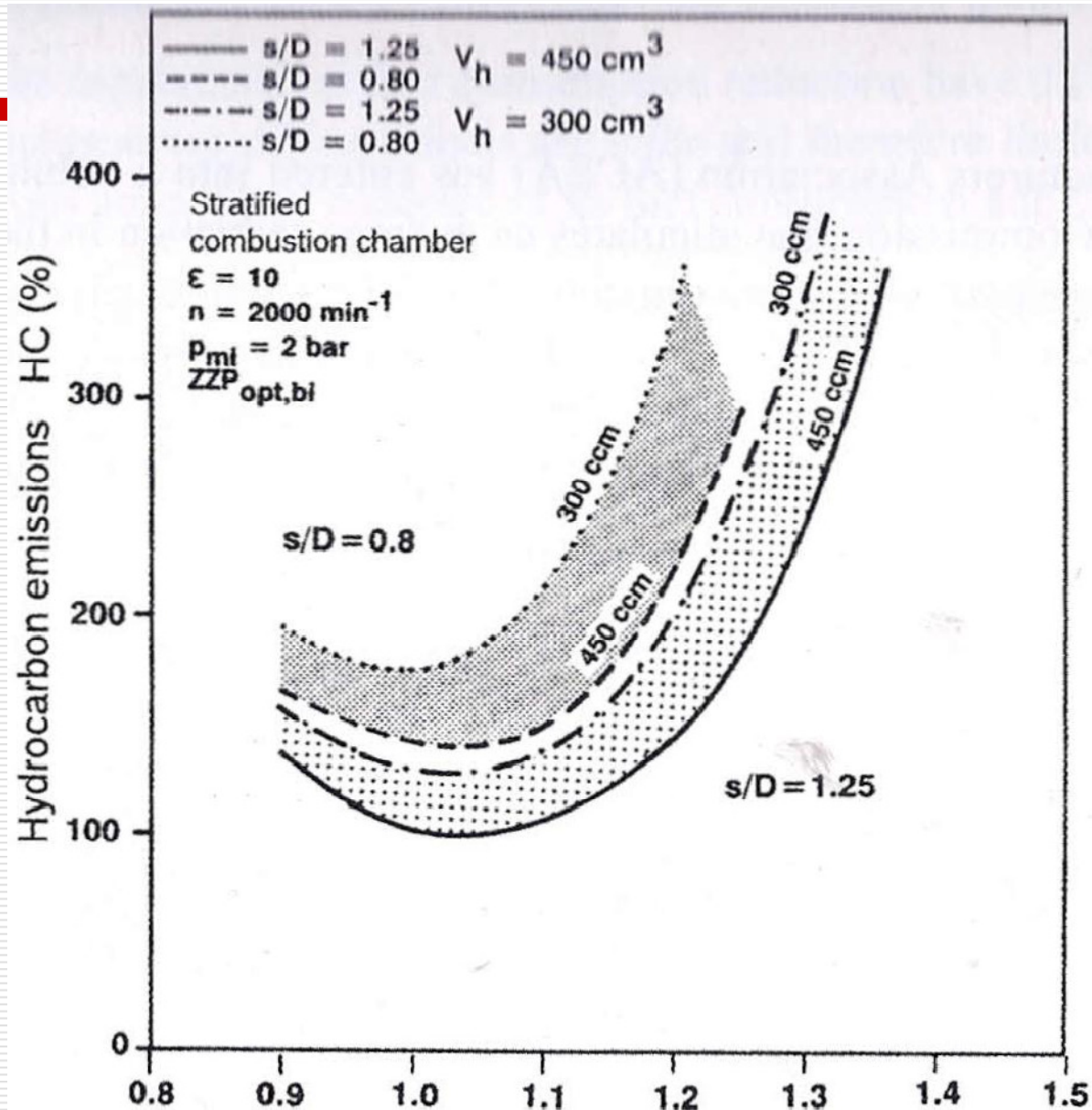


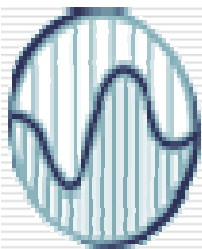
Смањење емисије издувних гасова

- ❑ Степен компресије би требао да буде што већи из разлога смањења потрошње (већи топлотни степен корисности).
- ❑ Са повећањем степена компресије расте емисија NOx и HC.
- ❑ Емисија NOx расте са повећањем температуре док HC расте због неповољног односа површина клипа/запремина (важно је да комора за сагоревање буде компактна)
- ❑ Код већег степена компресије, температура издувних гасова је мања (због бољег топлотног степена корисности) па је секундарно сагоревање у издувном колектору NOx и HC погоршано.

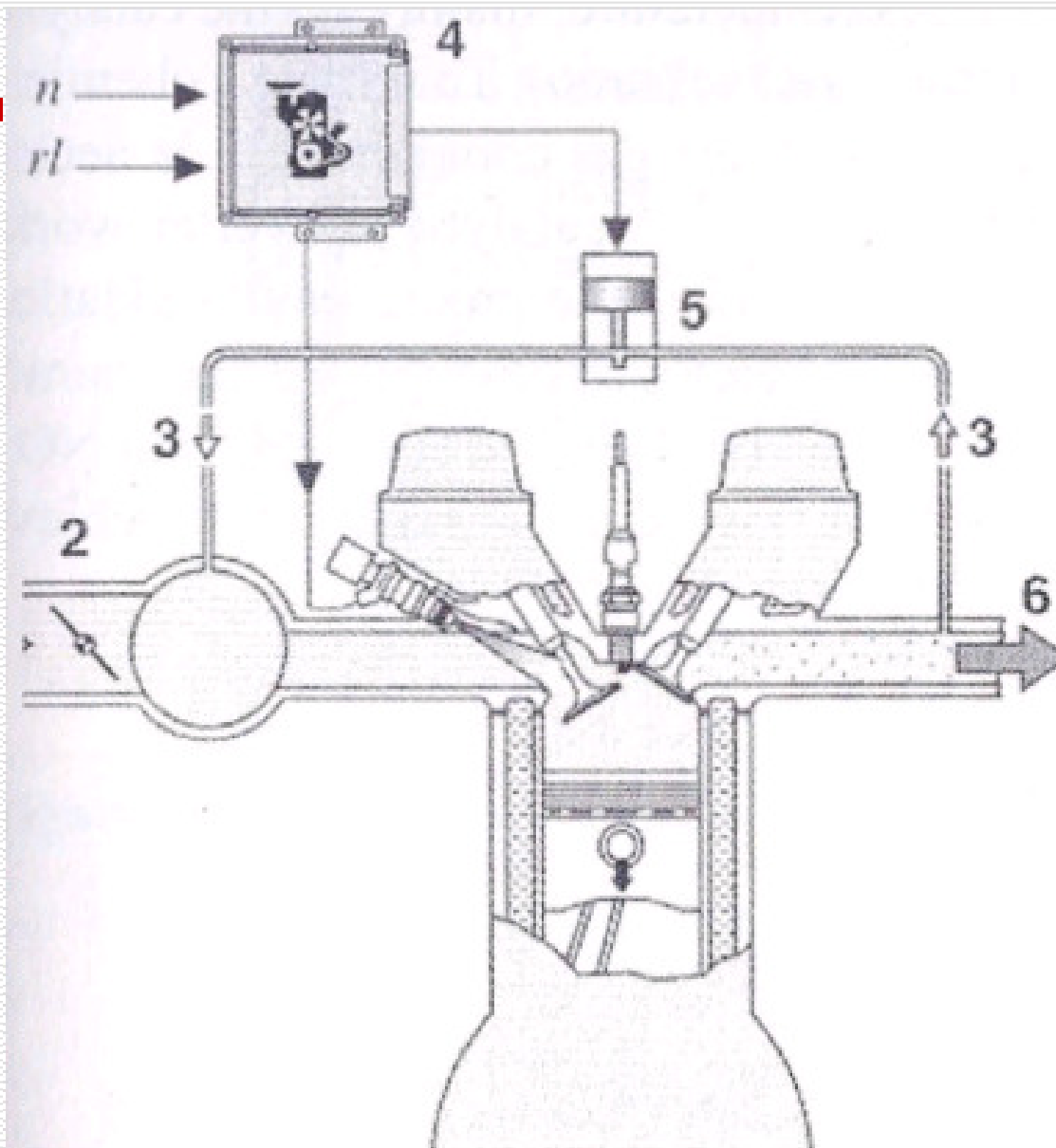


Зависност емисије НС од λ за различите коморе за





Смањење емисије издувних гасова - EGR





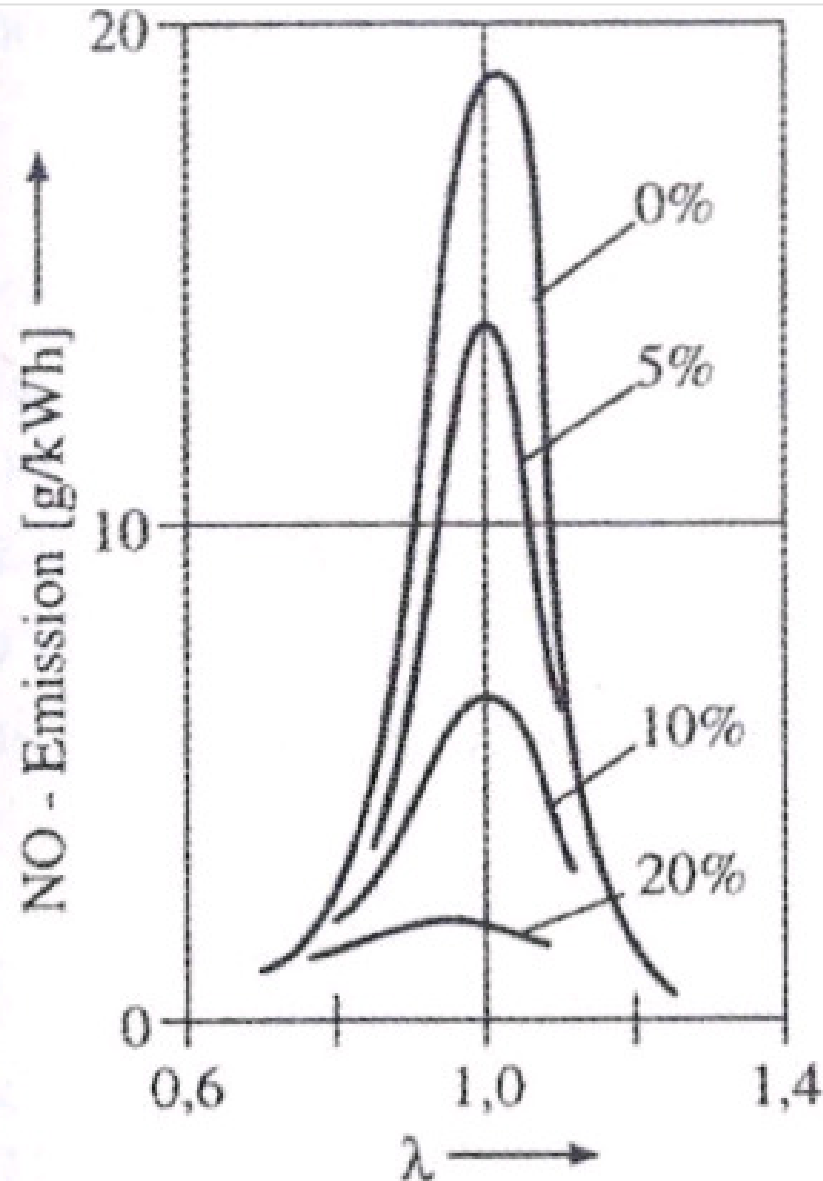
Смањење емисије издувних гасова

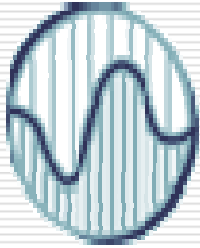
- Износ различитих штетних издувних гасова бензинских мотора зависи од:
 - 1) Геометријских параметара мотора - главе мотора и коморе за сагоревање, запремине, пречника клипа, степена компресије, позиције свећице и броја вентила.
 - 2) Радних параметара – момента предпаљења, момента убризгавања, састава смеше, рецикулације издувних гасова
 - 3) Третмана издувних гасова – каталитички конвертор, секундарни ваздух



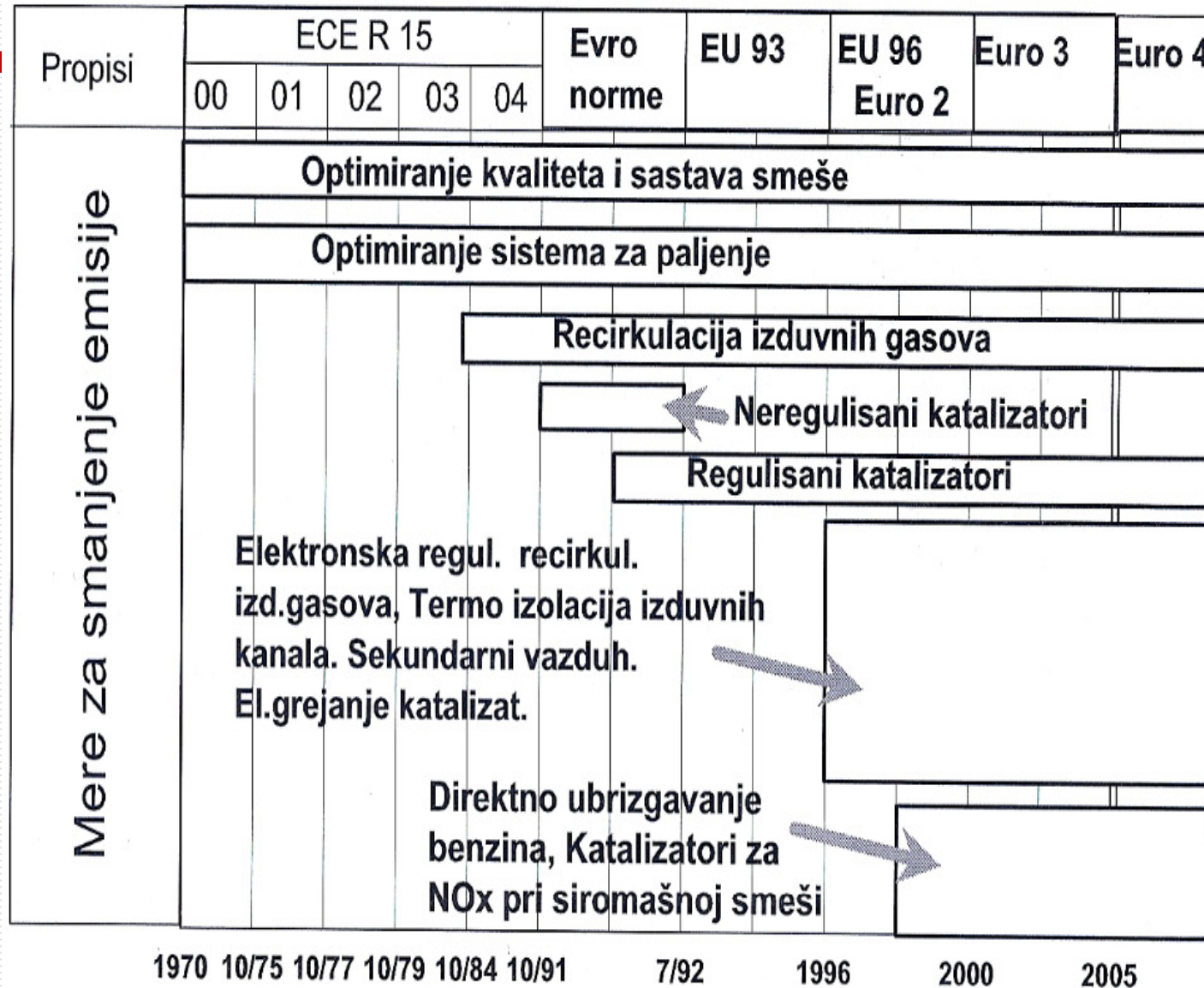
Утицај EGR-а на NOx

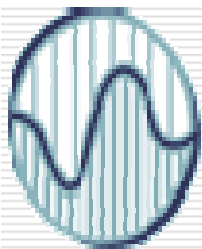
- ❑ EGR најчешће ради у режиму од 5 - 10% по запремини
- ❑ Код GDI мотора могућност рада до 50%



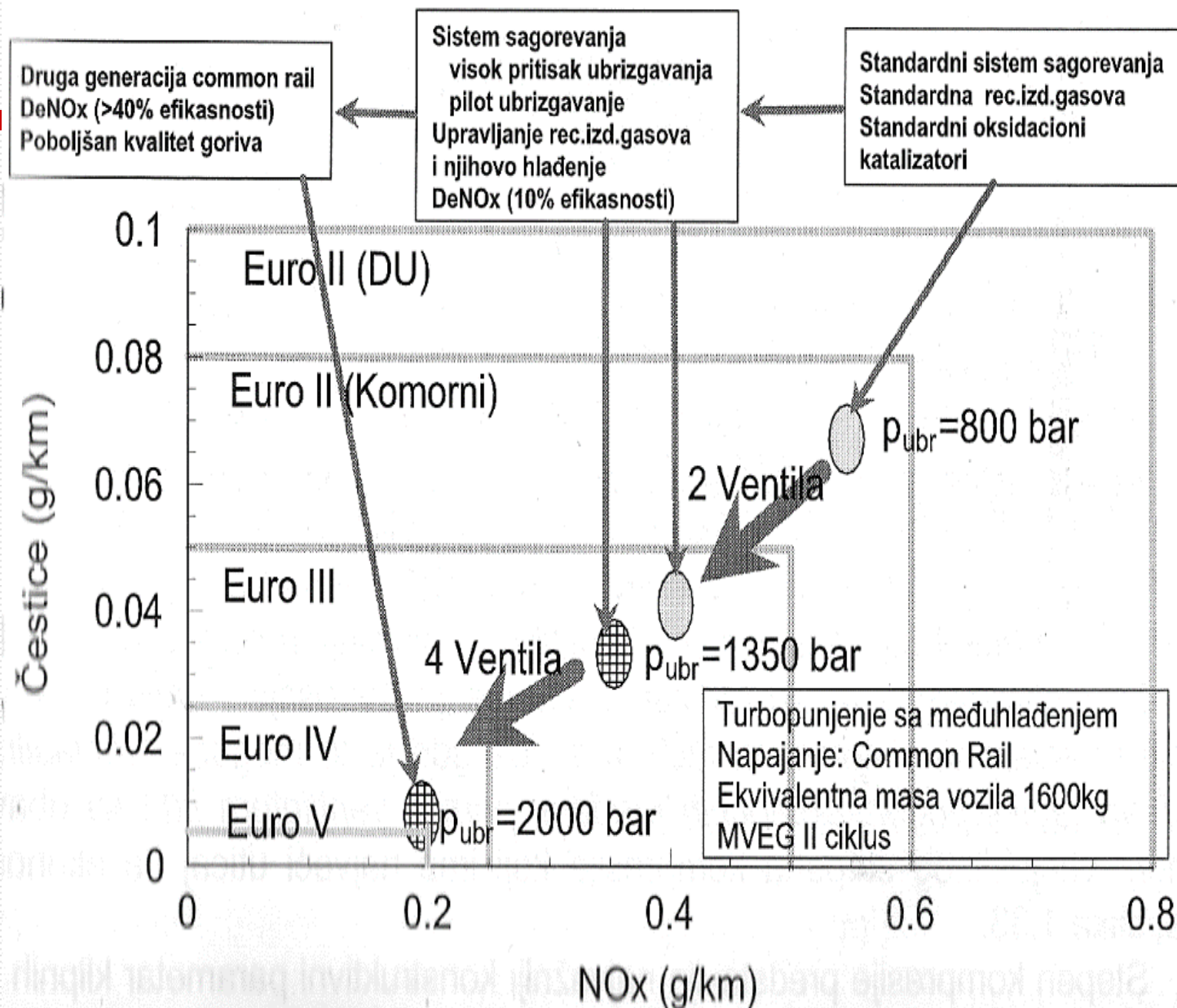


Техничка решења за смањење емисије ото мотора



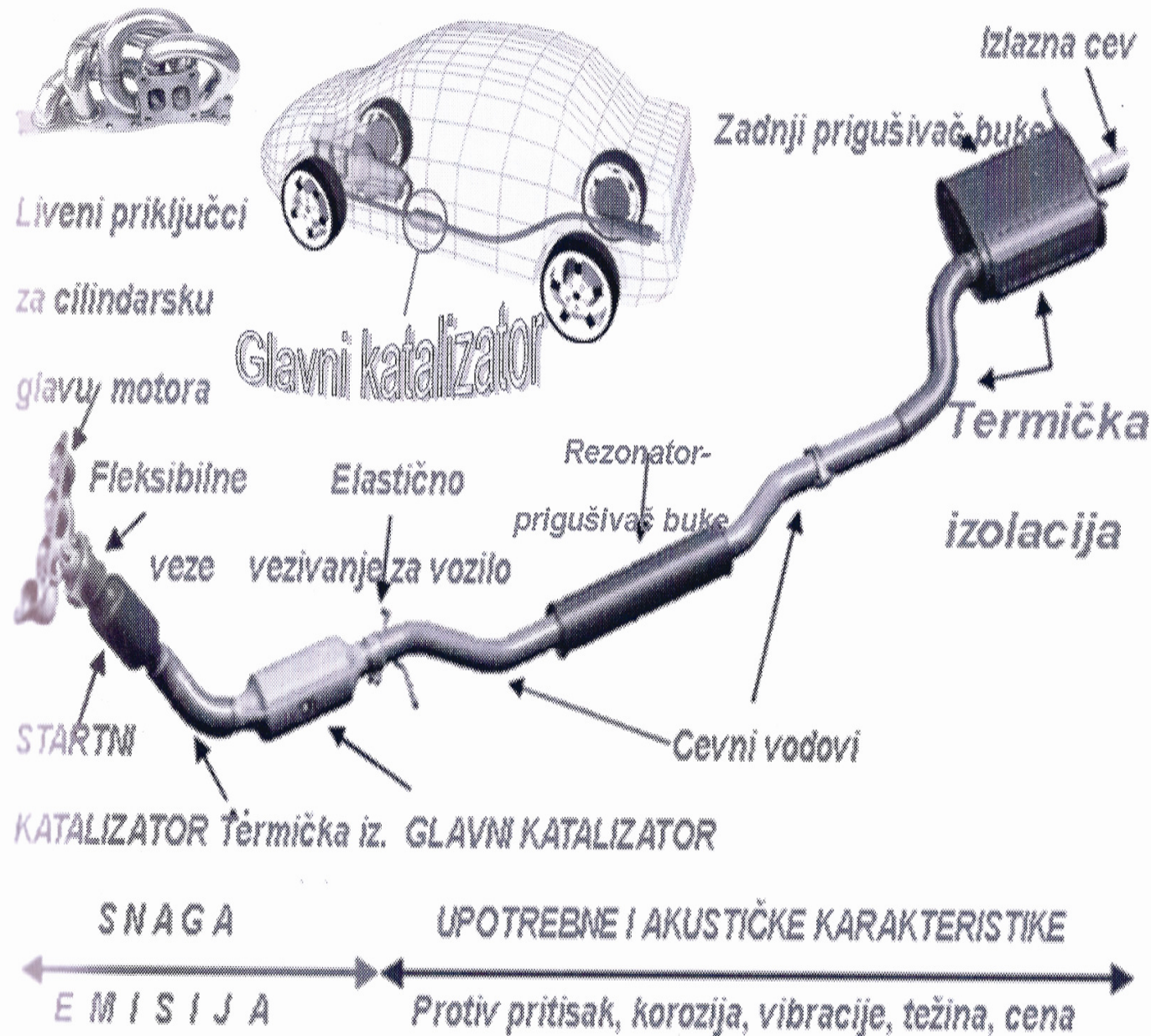


Техничка решења за смањење емисије дизел мотора



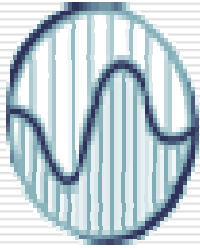


Издувни систем савременог ото мотора



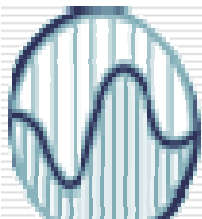
Елементи

- ☐ Издувни колектор
- ☐ Флексибилна веза
- ☐ Стартни катализатор
- ☐ Главни катализатор
- ☐ Цевни водови
- ☐ Пригушивачи буке
- ☐ Термичка изолација



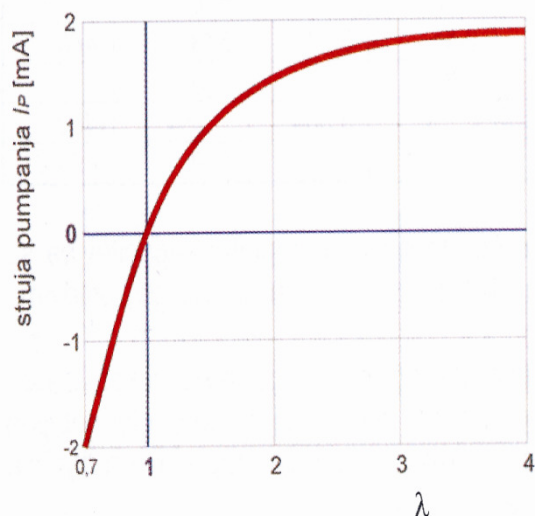
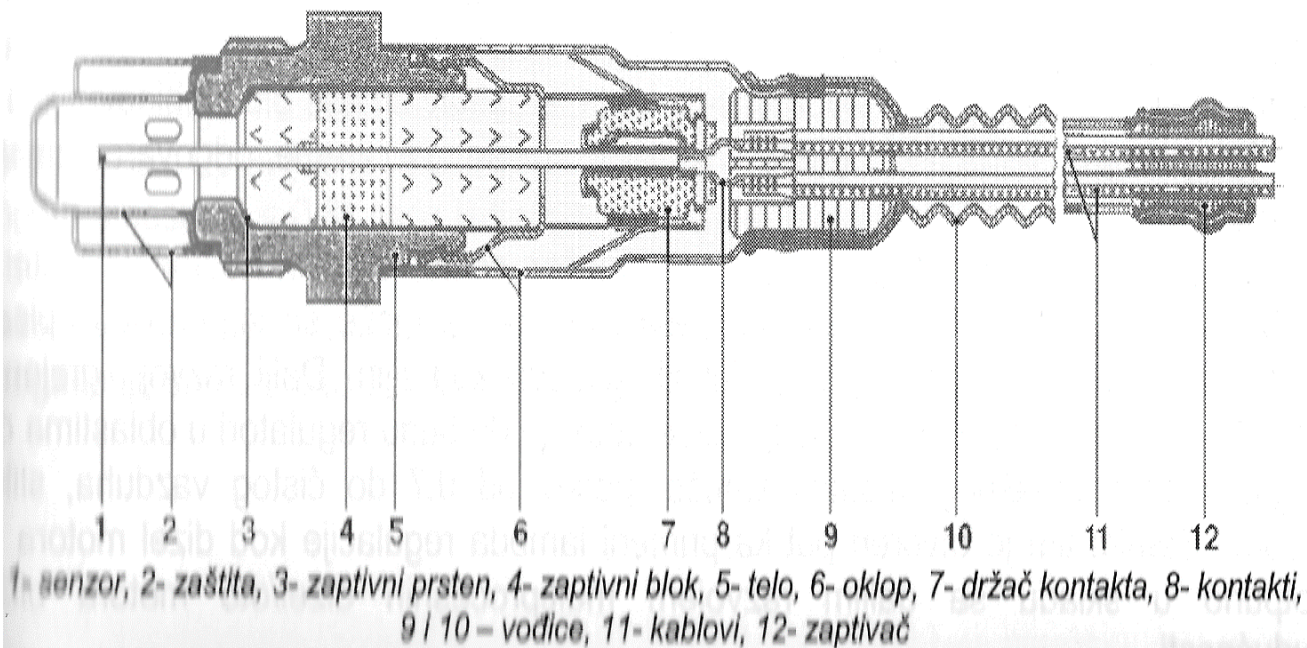
Обрада издувних гасова

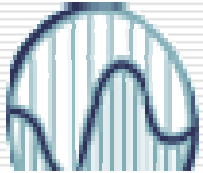
- Смањења издувне емисије и задовољавање еколошких прописа
- **Савремене технологије за обраду издувних гасова**
 - Трокомпонентни катализатори од племенитих метала
 - Стартни катализатори
 - Претходно загревање катализатора ради бржег активирања
 - Рециркулација издувних гасова, секундарни ваздух и др.
- **Катализатор**
 - Оксидациони (вишак кисеоника за довршавање процеса потпуног сагоревања)
 - Редукциони (одузимање кисеоника од оксида азота)
 - Адсорпциони (адсорпција гасова код јако сиромашне смеше ради убрзавања каталитичких процеса)
 - Селективни
 - Вишефункционални (најчешће трокомпонентни – CO, HC, NOx)



Регулација састава издувних гасова

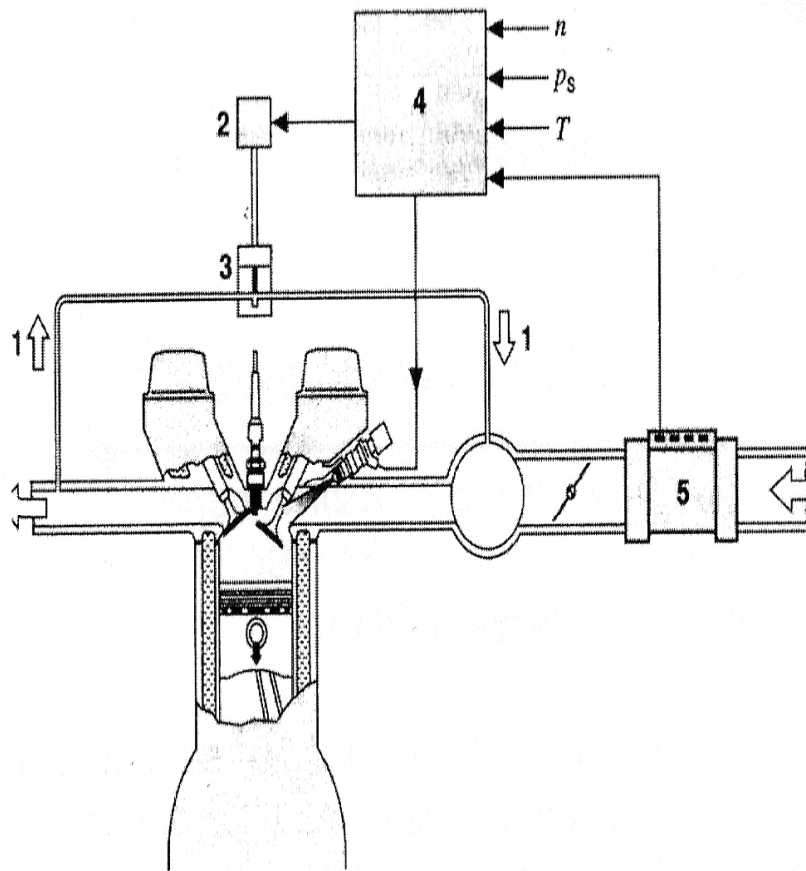
- ❑ Ламбда сонда – детекција кисеоника у издувним гасовима
- ❑ Класична ламбда регулација функционише у области стехиометријске смеше
- ❑ Широкопојасне грејане ламбда сонде треба да регулишу у области од 0,7 до чистог ваздуха
- ❑ Обавезно додавање секундарног ваздуха у издувне гасове, посебно код богате смеше



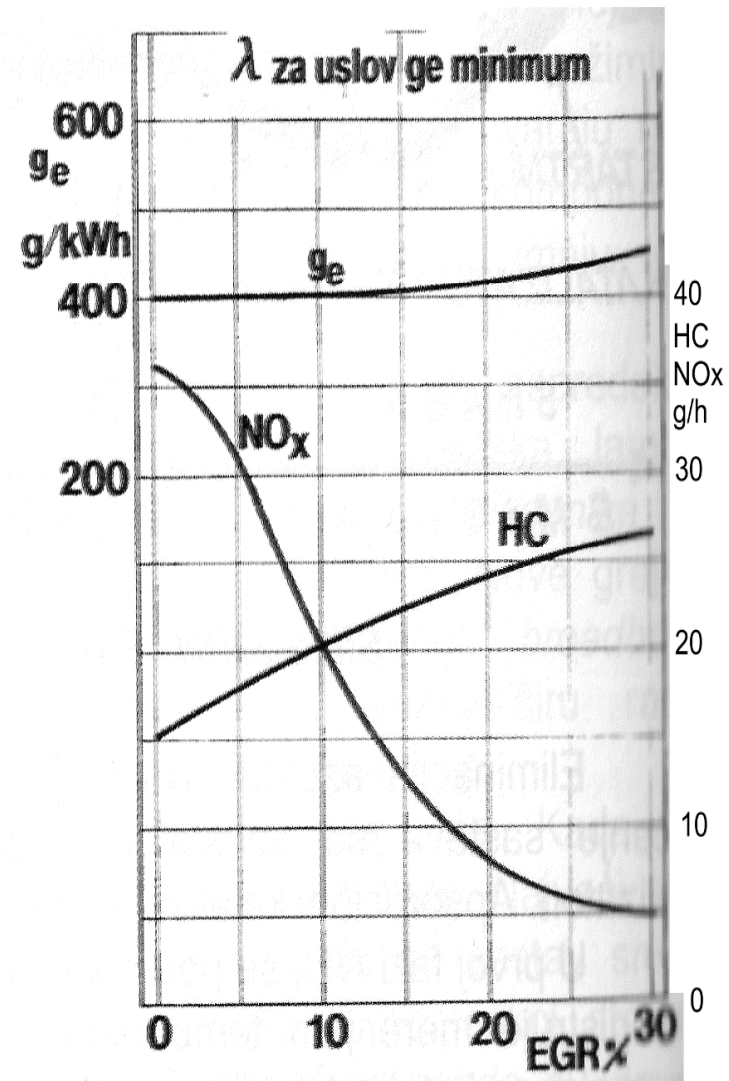


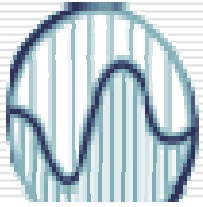
Смањење емисије азотових оксида код сиромашних смеша

- Апсорпциони NO_x катализатори
- Рециркулација издувних гасова



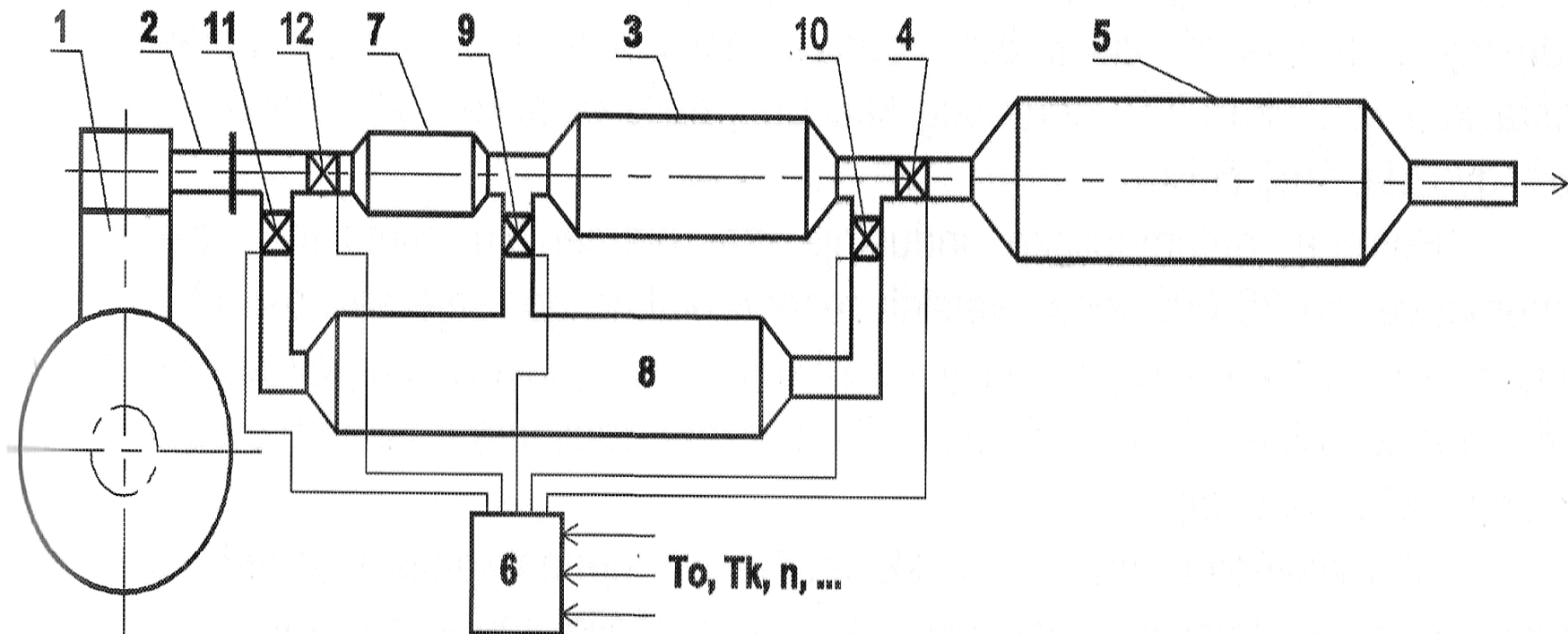
1- издувни гасови; 2- управљање; 3- ventil;
4- EUJ; 5- usisna cev



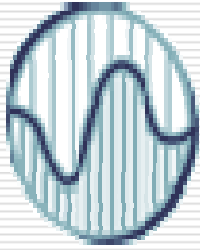


Терморегулација катализатора

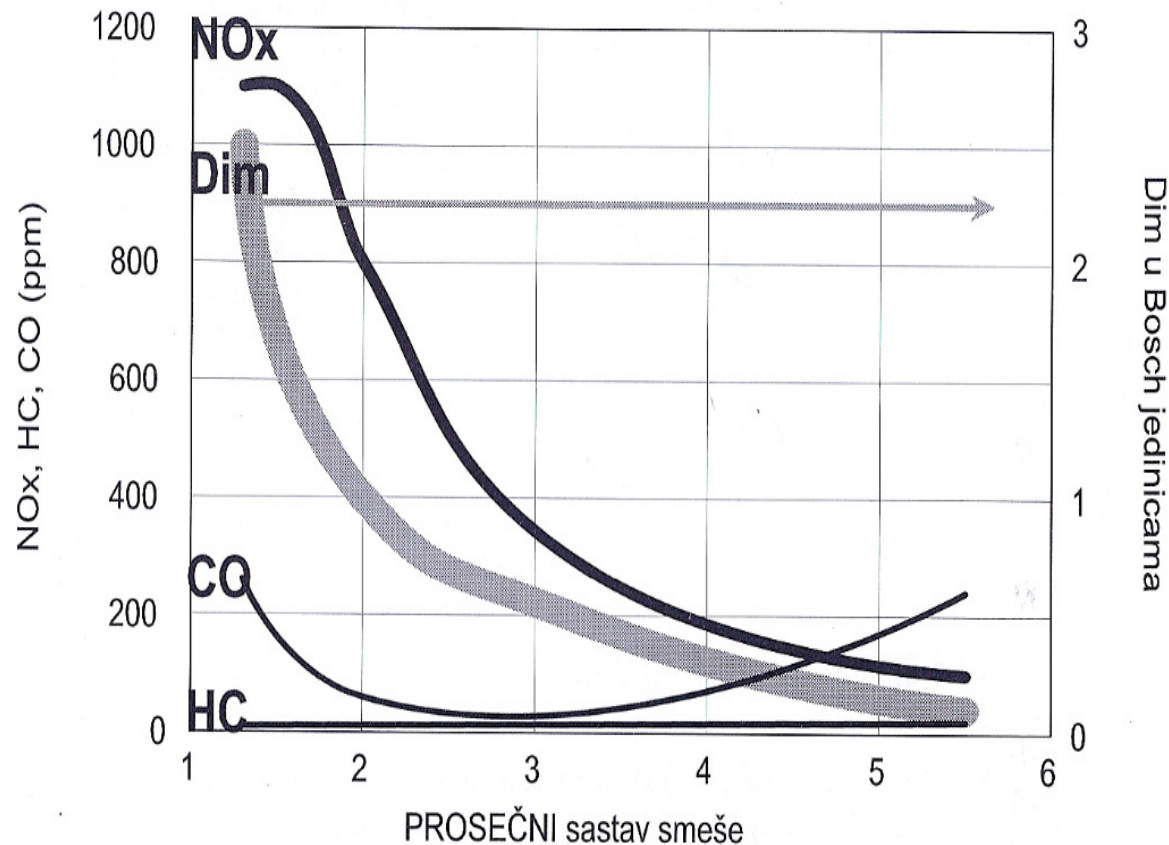
- Једина могућност да се задовоље садашњи захтеви за издувну емисију који се односе на „емисију при старту хладног мотора“
- Могућности: грејачи катализатора или техничка решења која обезбеђују загревање издувног система контролисаном циркулацијом издувних гасова



1- motor; 2- izduvna cev; 3- glavni katalizator; 5- izduvni lonac; 6- EUJ;
7- startni katalizator; 8- rezervoar nesagorelih gasova; 4, 9, 10, 11, 12- regulacioni ventili



Пречишћавање издувних гасова дизел мотора

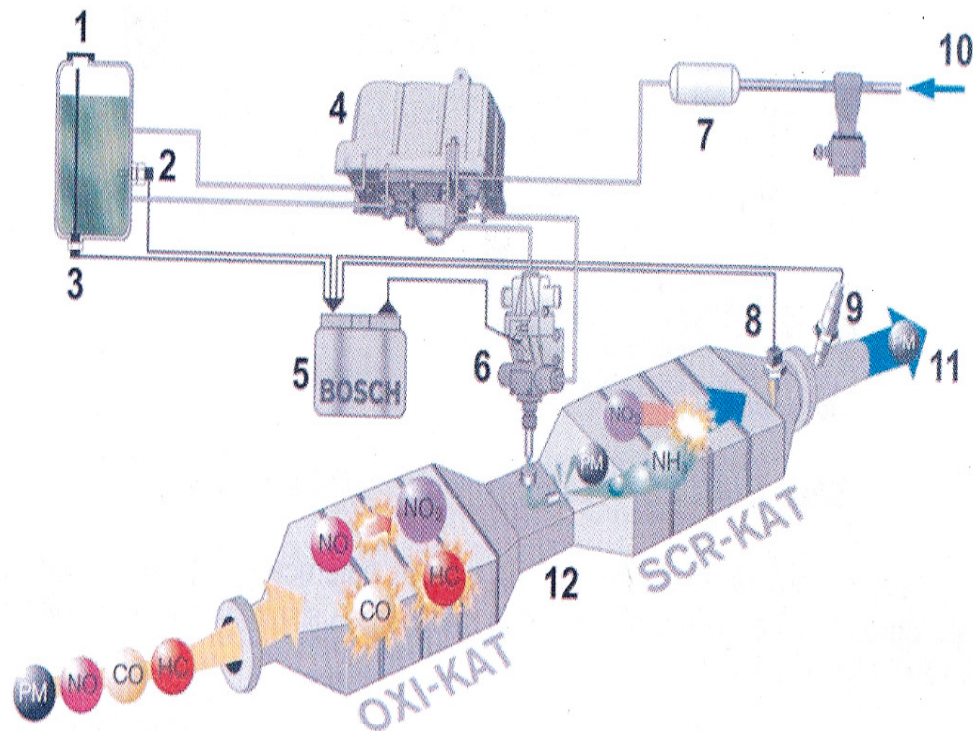


- ❑ Дизел мотори раде у области сиромашне смеше, тако да познате технике примењене код ото мотора (трокомпонентни катализатори) не могу обезбедити одговарајућу редукцију оксида азота
- ❑ Емисија CO последица локалног богатог састава смеше (мања него код ото мотора)
- ❑ Највећи загађивачи из ото мотора су оксиди азота и честице
- ❑ Накнадна обрада издувних гасова мора да смањи издувну емисију за близу десет пута

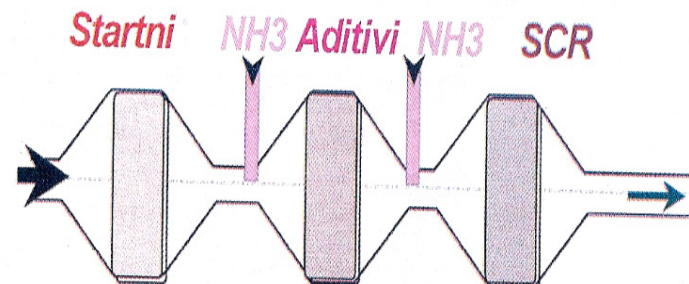


Селективна каталитичка редукција (SCR)

- Смањење емисије NOx и HC додавањем мешавине амонијака и урее (AdBlue) испред редукционог катализатора
- Више се примењује у моторима који имају мање нестационарне услове рада (камионски)



1- rezervoar rastvora uree (AdBlue), 2- senzor temperature, 3- senzor za nivo tečnosti, 4- modul doturanja, 5- upravljački uređaj, 6- modul za doziranje, 7- rezervoar vazduha, 8- senzor temperature, 9- senzor Izduvnih gasova, 10- dovod vazduha, 11- izlaz gasova, 12- cev raspršivača.



Startni katalizator: $\text{NO} + 1/2 \text{O}_2 = \text{NO}_2$

Katalizator sa aditivima: $(\text{NH}_3)_2\text{CO} + \text{NO} + \text{NO}_2 = 2\text{N}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

SCR- selektivni katalizator: $2\text{NH}_3 + \text{NO} + \text{NO}_2 = 2\text{N}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$

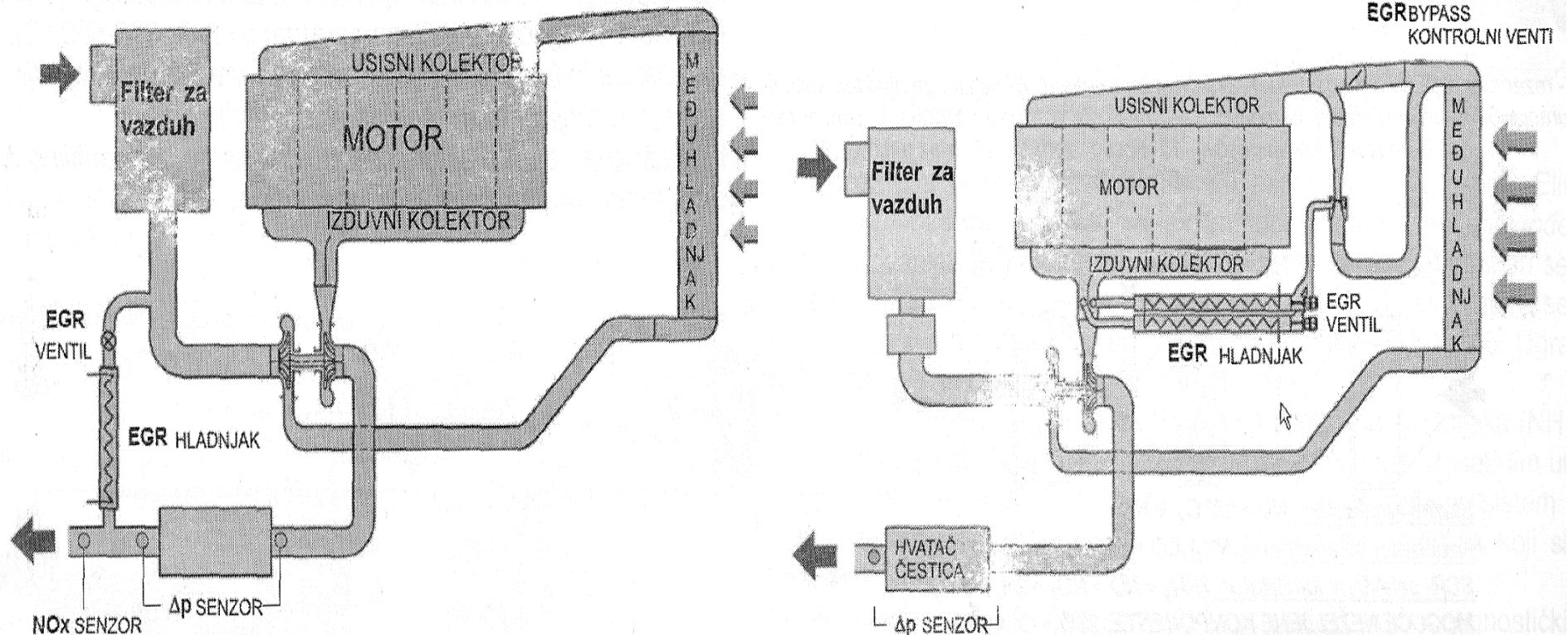
MOGUĆE NEŽELJENE KOMPONENTE: $2\text{SO}_2 + \text{O}_2 = 3\text{SO}_3$

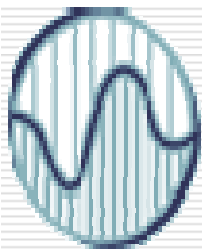
$4\text{NH}_3 + 5\text{O}_2 = 4\text{NO} + 6\text{H}_2\text{O}$



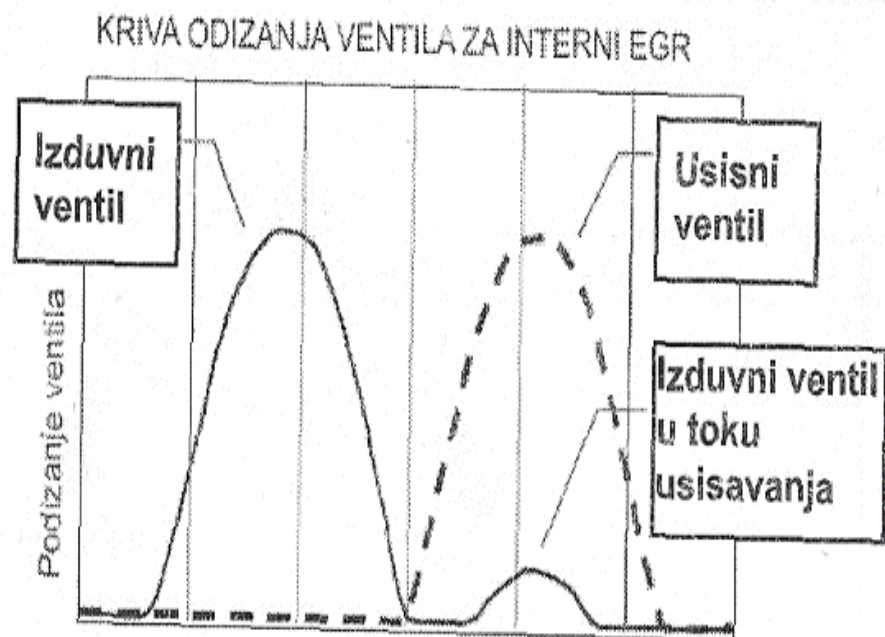
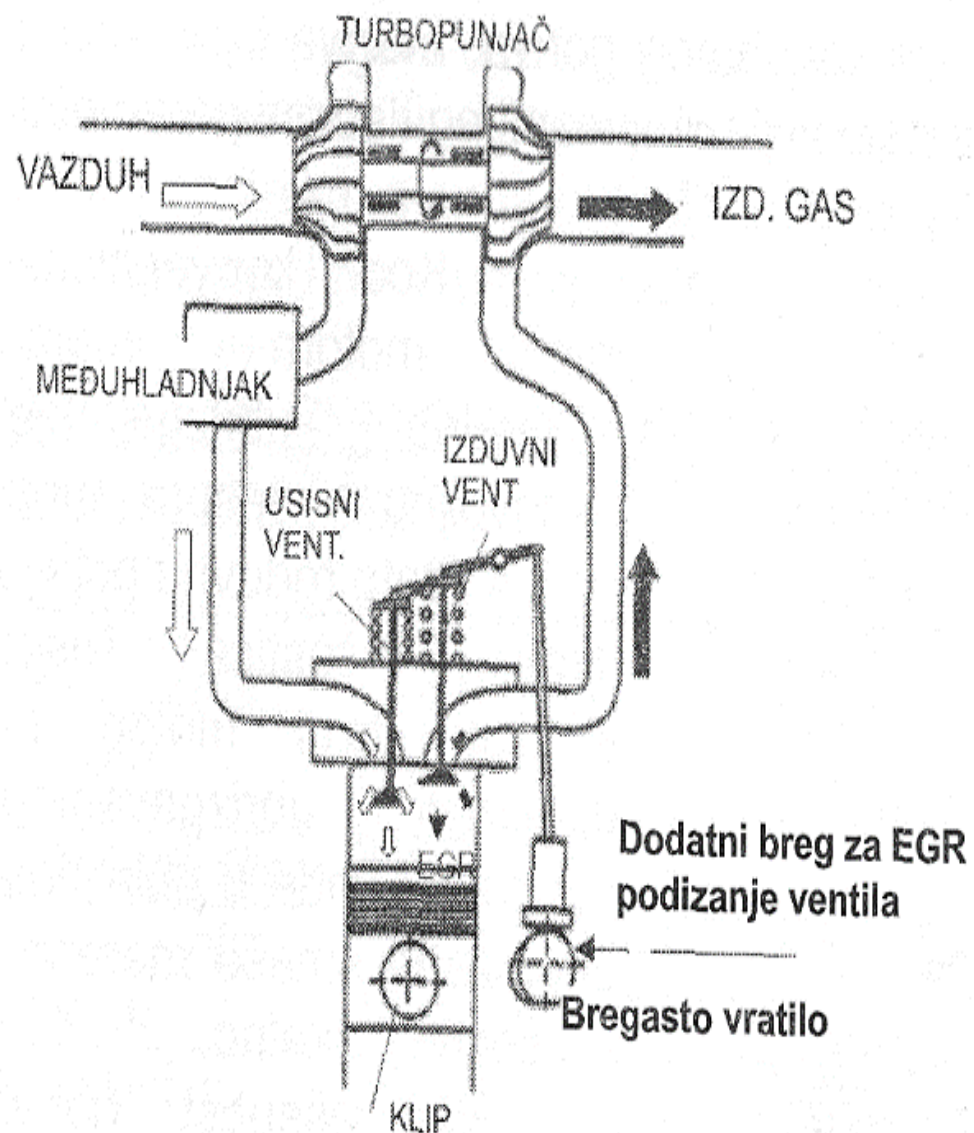
Рециркулација издувних гасова

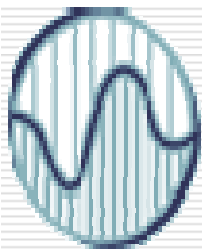
- На ниском притиску (путничка и доставна возила – честе промене и делимична оптерећења), на високом притиску (теретна возила, пуно оптерећење) или унутрашња (преко система развода)



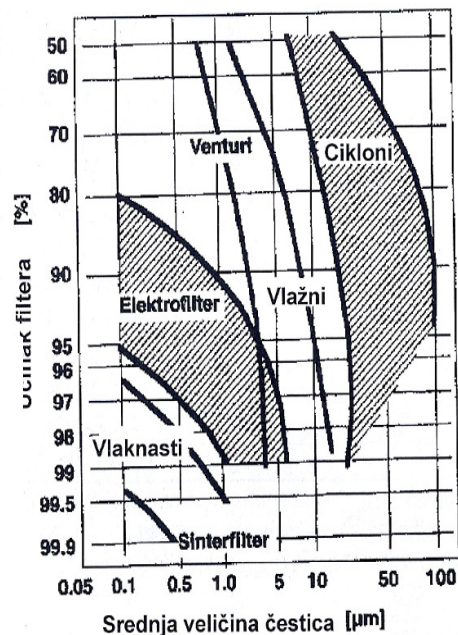
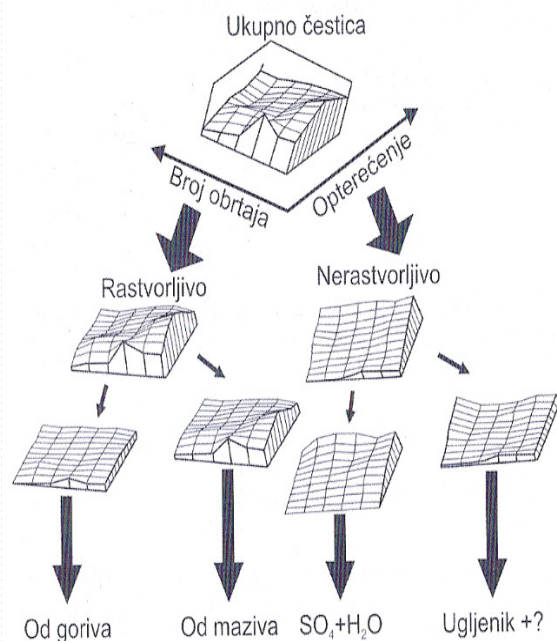


Унутрашња рецикулација издувних гасова

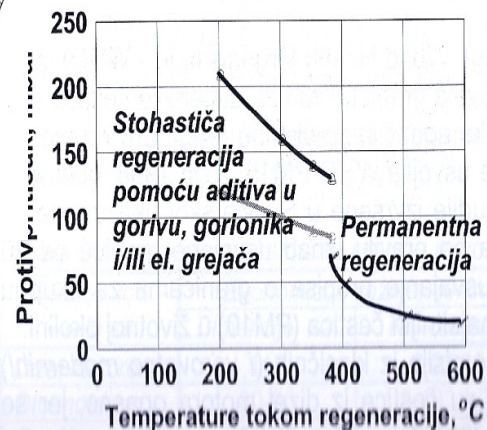




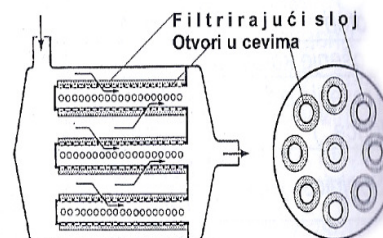
Емисија честица



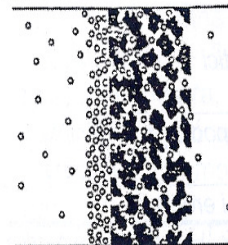
a) Protiv pritisak tokom regeneracije



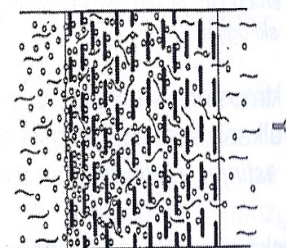
b) Hvatač čestica



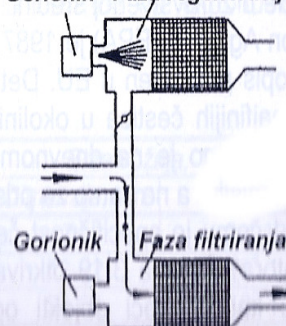
c) Zapreminski aktivni filtri



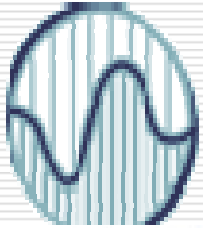
d) Površinski aktivni filtri



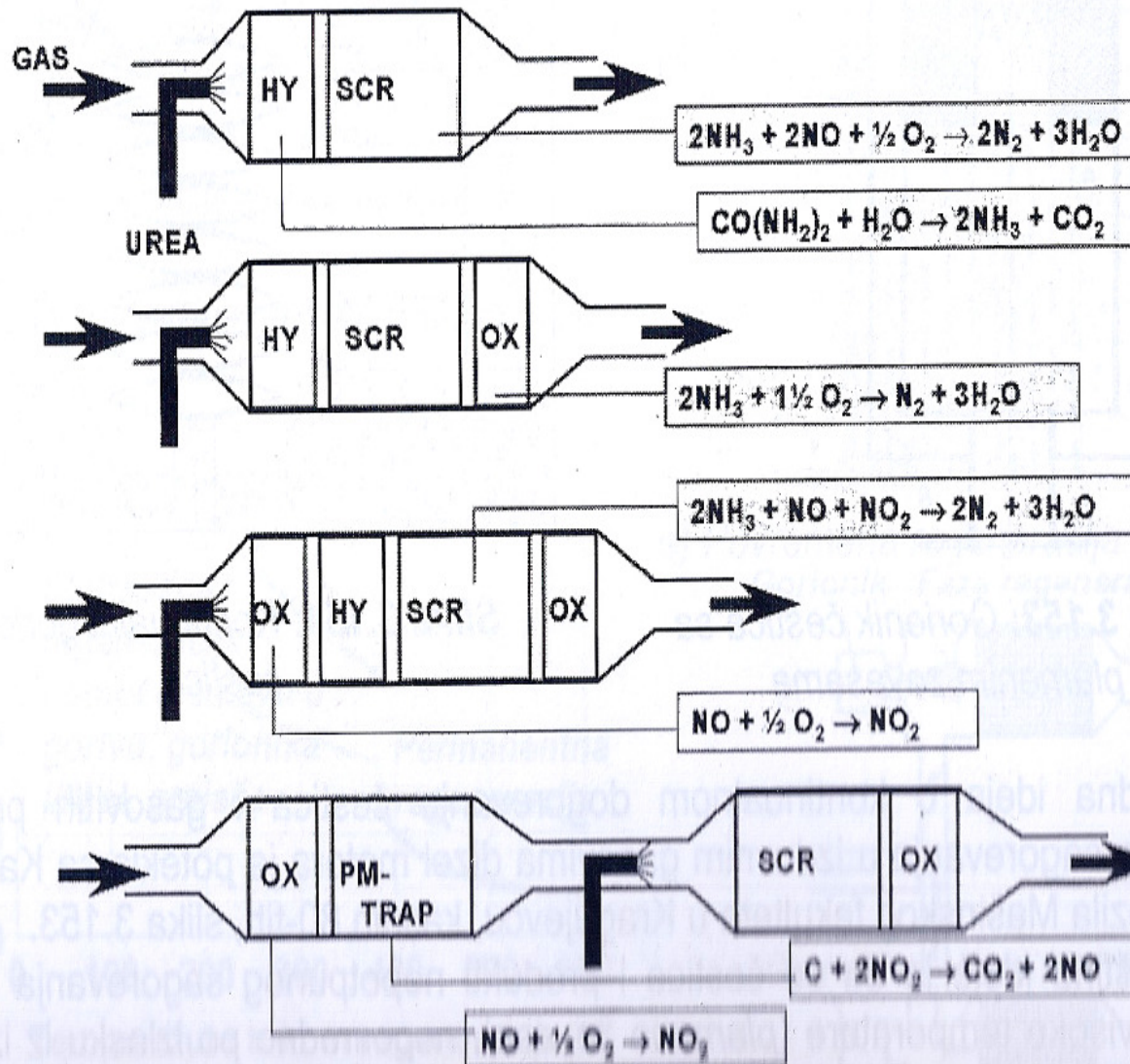
e) Povremena regeneracija
Gorionik Faza regeneracije



- Највећи извори честица и честичног загађења су горива и мазива
- Код конвенционалних мотора емисија честица последица накнадног убризгавања
- Тренутно су у примени керамички и синтер, влакнасти и метални филтри великих активних површина



Комбиновани системи за пречишћавање гасова



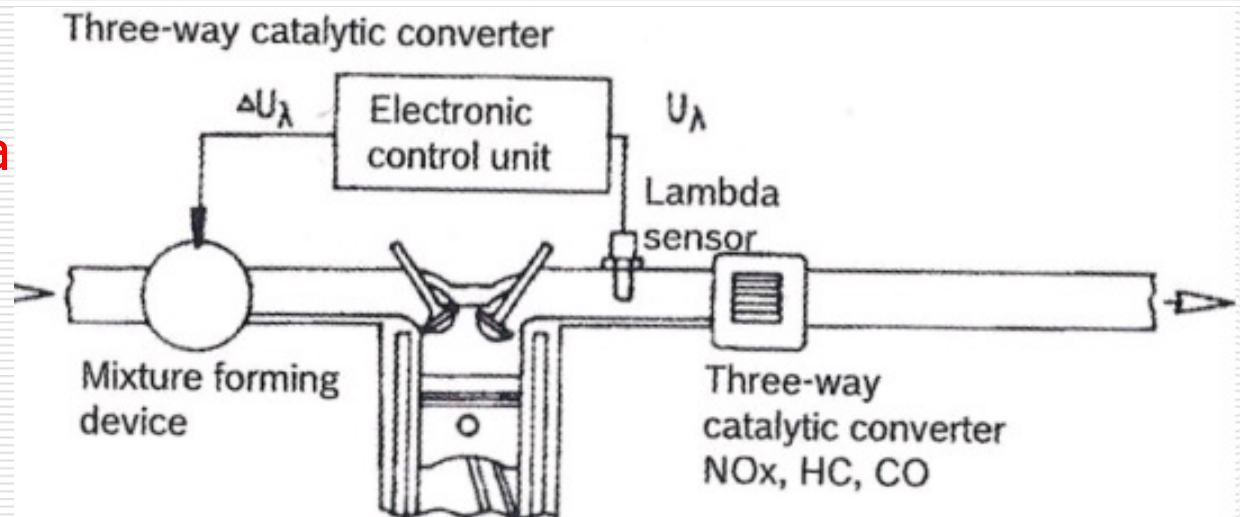
HY- hidrolitički katalizatori, OX- oksidacioni, PM-TRAP hvatači čestica

- Комбинација филтера и катализатора ради високог оксидационог или DeNOx учинка



Третман издувних гасова

- Третман издувних гасова каталитичким конвертором је најефикаснији начин за смањење емисије штетних гасова!
- Третман издувних гасова зависи од:
 - Температуре
 - Каталитичког ефекта материјала
 - Односа смеше горива и ваздуха





Третман издувних гасова

-
- **Каталитички конвертори** се могу поделити у две категорије:
 - **Са континуалним радом** – тростепени каталитички конвертори
 - **Са повременим радом** – акумулаторски конвертори

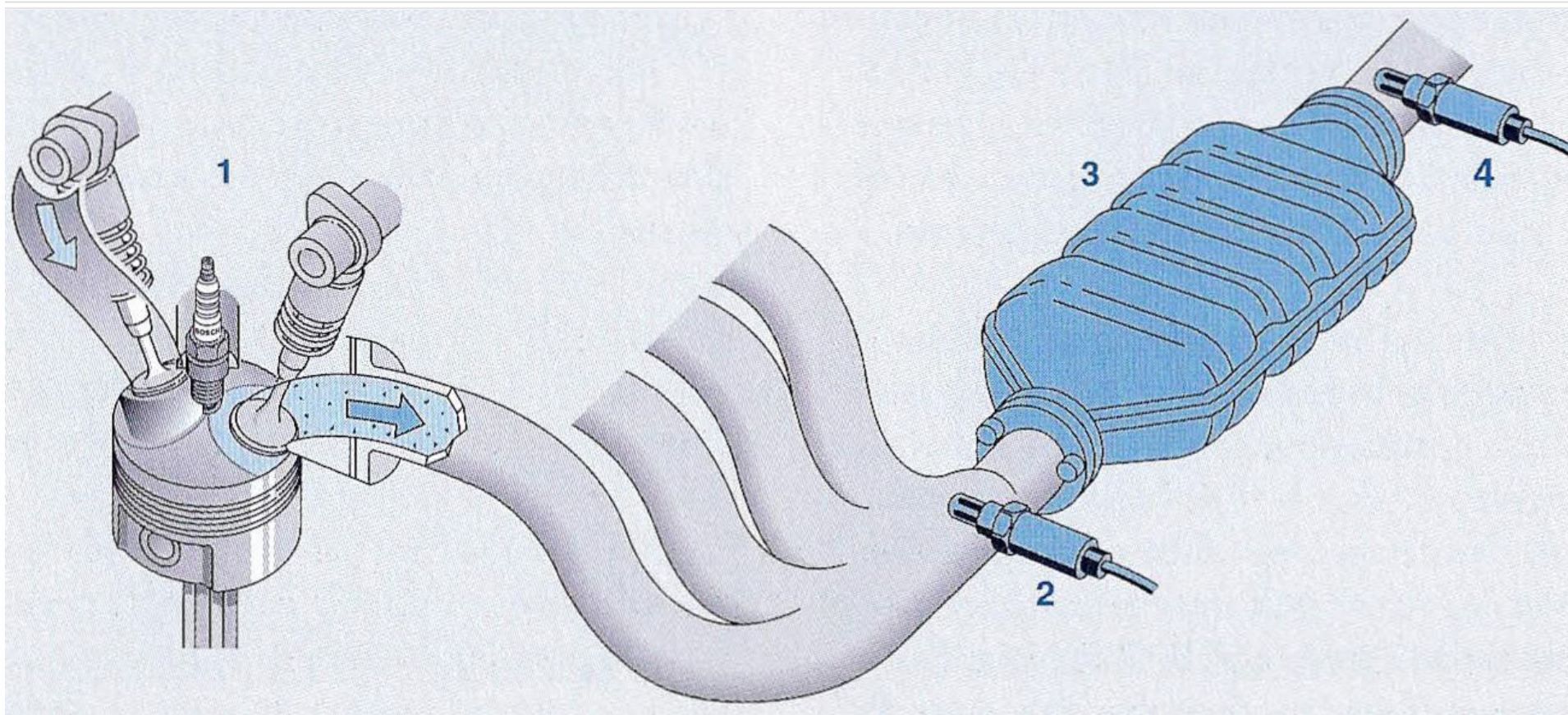


Третман издувних гасова

- У случају рада са хомогеном смешом и $\lambda = 1$ и нормалном радном температуром, тростепени каталитички конвертор теоријски може потпуно да елиминише све штетне гасове.
- У случају рада са сиромашном смешом $\lambda > 1$ тростепени каталитички конвертор не може да елиминише NO_x , па је неопходан додатни NO_x акумулаторски каталитички конвертор.



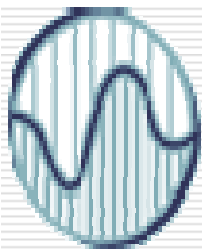
Тростепени каталитички конвертор





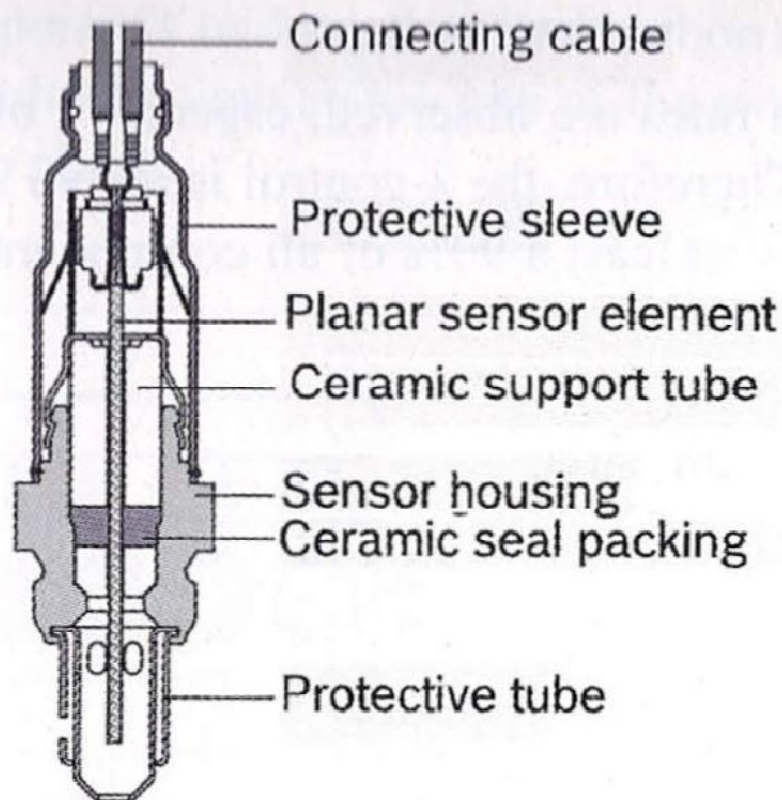
Тростепени каталитички конвертор

- Каталитички конвертор претвара штетне гасове CO , HC и NO_x у нетоксичне H_2O , CO_2 и N_2
- CO и HC се конвертују кроз процес оксидације, док се NO_x конвертује процесом редукције
- Тростепени каталитички конвертор истовремено смањује све три компоненте.
- За ефикасан рад неопходан је комплексан λ управљачки систем

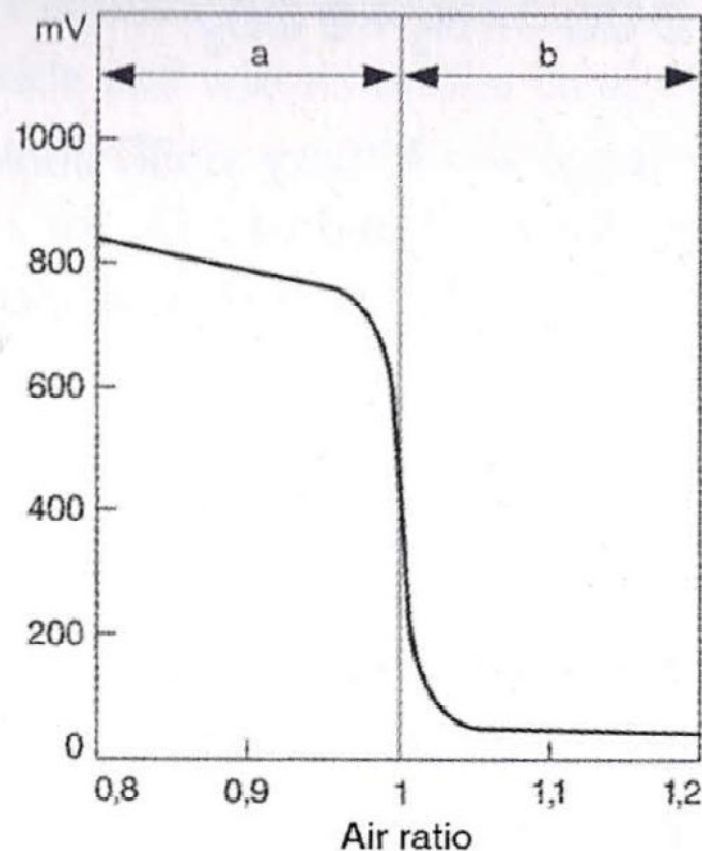


Третман издувних гасова током рада са стохиометријском смешом

λ – сонда, двостепена

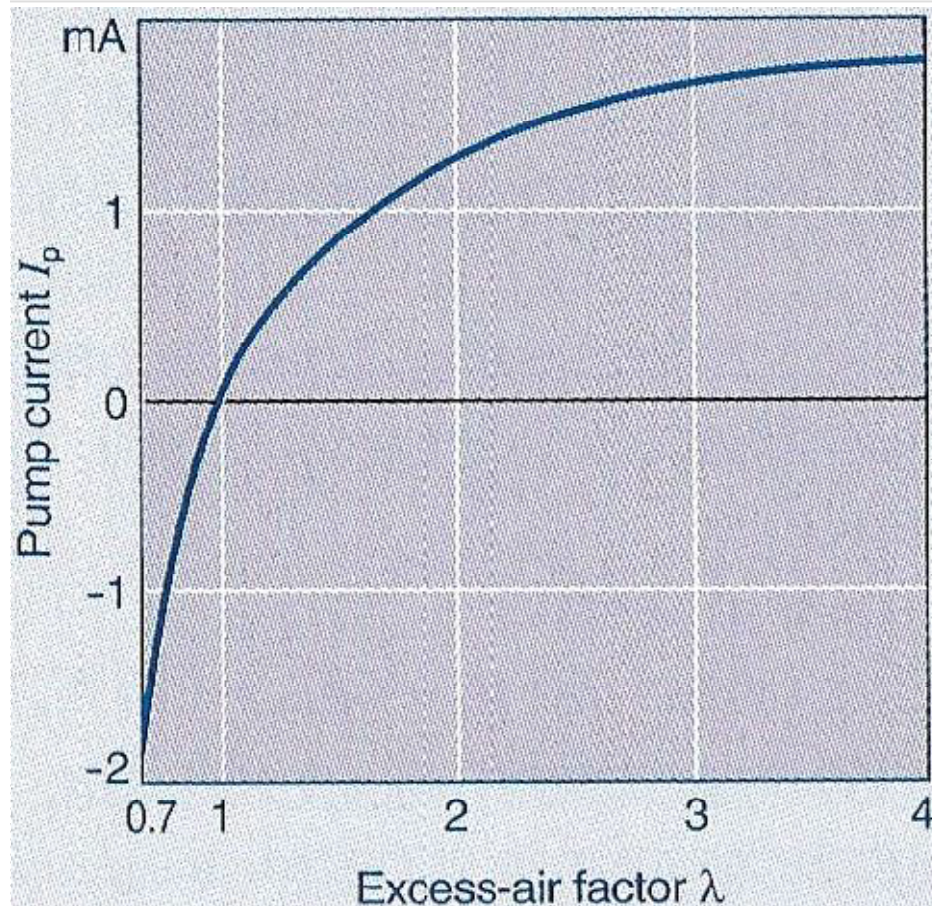


Voltage characteristic curve of the exhaust gas sensor at an exhaust gas temperature of 600 °C





Ламбда сонде – широкопојасна



- ❑ Широкопојасна ламбда сонда има могућност мерења много већег опсега концентрације кисеоника у продуктима сагоревања.
- ❑ Погодна је за рад система код којих се врши контрола не само стехиометријске смеше, већ и у режимима богате и сиромашне смеше.
- ❑ Опсег рада је $0,7 < \lambda < \infty$ (теоријски)

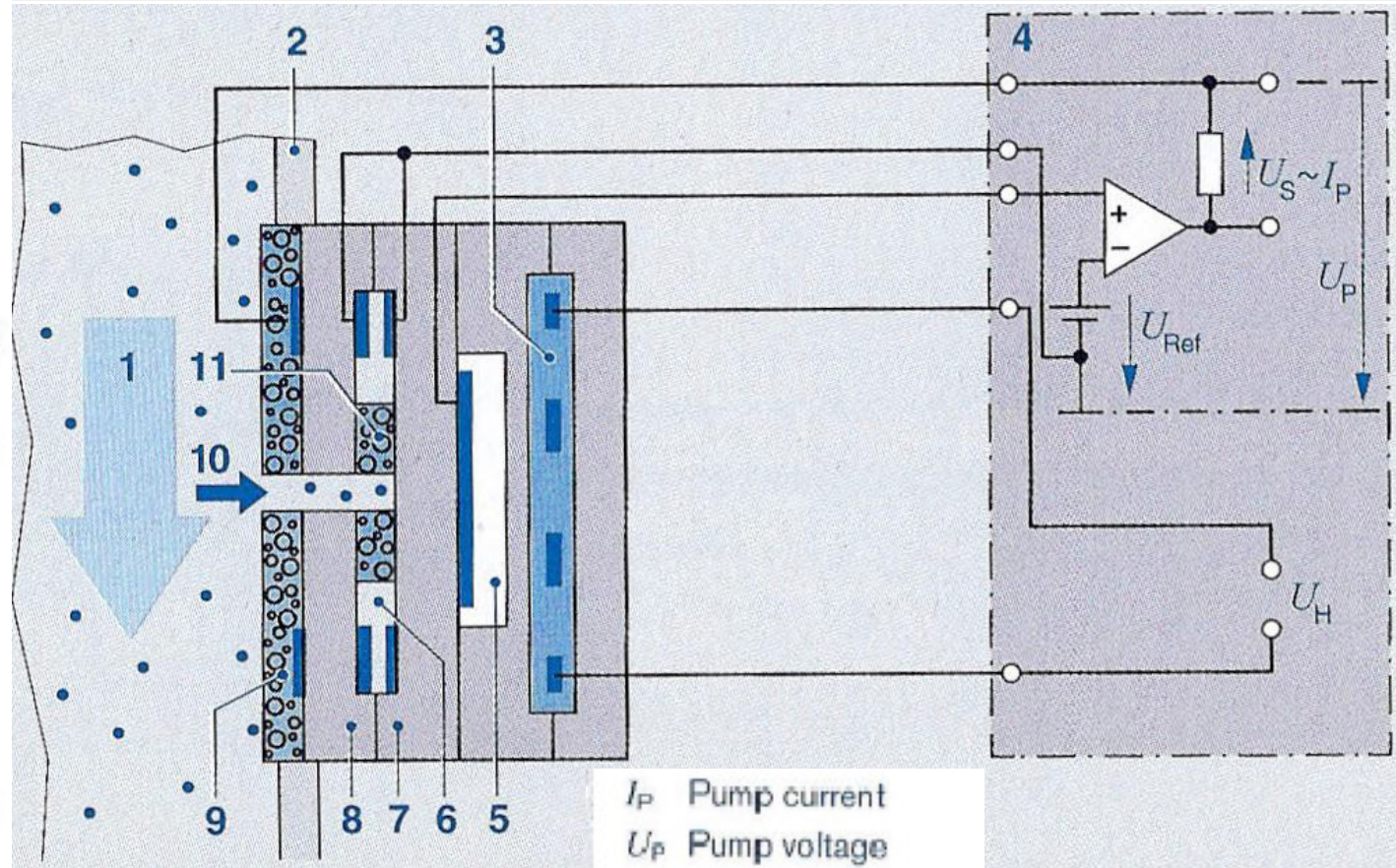


Ламбда сонде – широкопојасна

- По конструкцији представља равански двоћелијски сензор са ограниченом струјом
- Мерна ћелија састоји се од керамике (цирконијум диоксид), Нернстове ћелије (која функционише по истом принципу као и двостепена сонда) и кисеоничке пумпне ћелије која служи за транспорт јона кисеоника.
- Између Нернстове ћелије и кисеоничке пумпне ћелије налази се дифузиони простор $10\text{-}50\text{ }\mu\text{m}$ који је повезан за издувним гасовима преко пролаза (10)
- Порозна дифузиона баријера (11) служи да ограничи ток кисеоникових молекула из издувних гасова
- Нернстова ћелија је са једне стране повезана са референтном атмосфером (5) а са друге стране са издувним гасовима.
- Грејач (3) обезбеђује радну температуру од $650\text{-}900^{\circ}\text{C}$

Ламбда сонде – широкопојасна

- 1 Exhaust gas
- 2 Exhaust pipe
- 3 Heater
- 4 Control electronics
- 5 Reference cell with reference-air passage
- 6 Diffusion gap
- 7 Nernst concentration cell with Nernst measuring electrode (on diffusion-gap side) and reference electrode (on reference-cell side)
- 8 Oxygen pump cell with pump electrode
- 9 Porous protective layer
- 10 Gas-access passage
- 11 Porous diffusion barrier



I_P Pump current
 U_P Pump voltage
 U_H Heater voltage
 U_{Ref} Reference voltage
 (450 mV,
 corresponds
 to $\lambda = 1$)
 U_S Sensor voltage

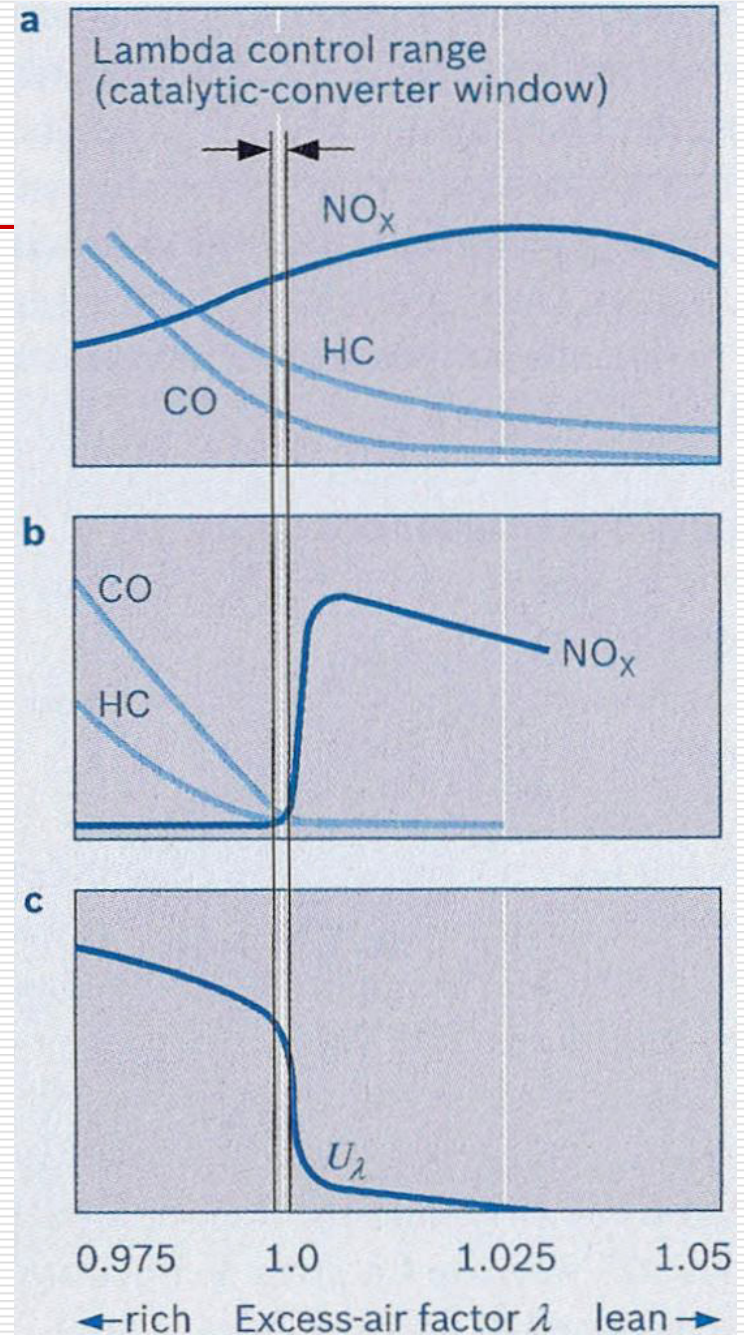
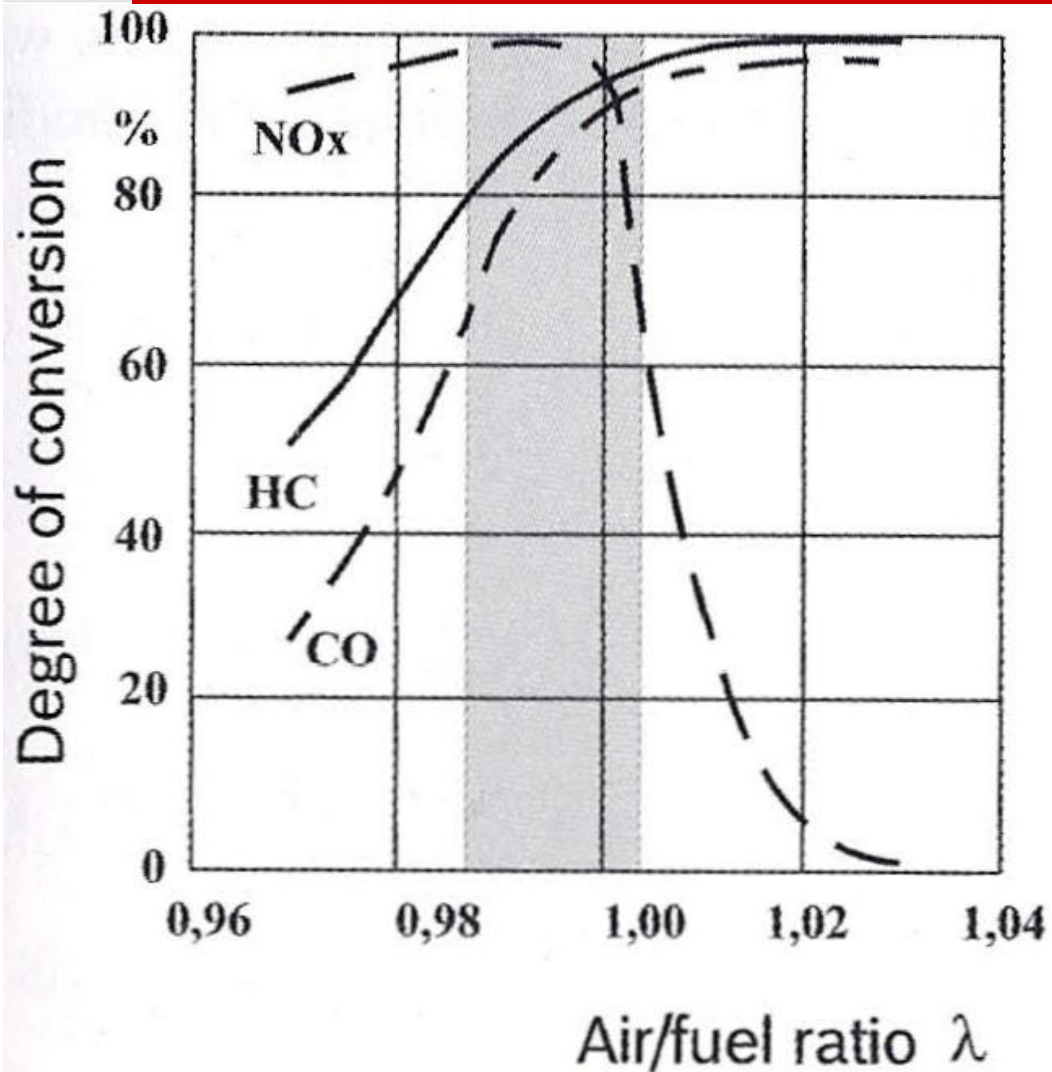


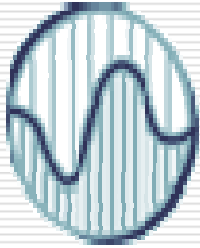
Ламбда сонде – широкопојасна

- Довођењем пумпног напона на платинску электроду, кисеоник из издувних гасова упумпава се кроз дифузиону баријеру у или изван дифузионог простора.
- Помоћу Нернстове ћелије ЕУЈ управља напонам пумпне ћелије у циљу да композиција гаса у дифузионом простору остане константна – $\lambda=1$
- Ако је смеша сиромашна пумпна ћелија усмерава кисеоник ка споља (позитивна пумпна струја)
- Уколико је ситуација супротна, кисеоник се из издувних гасова уводи у дифузиони простор (негативна пумпна струја)
- Пумпна струја је пропорционална концентрацији кисеоника

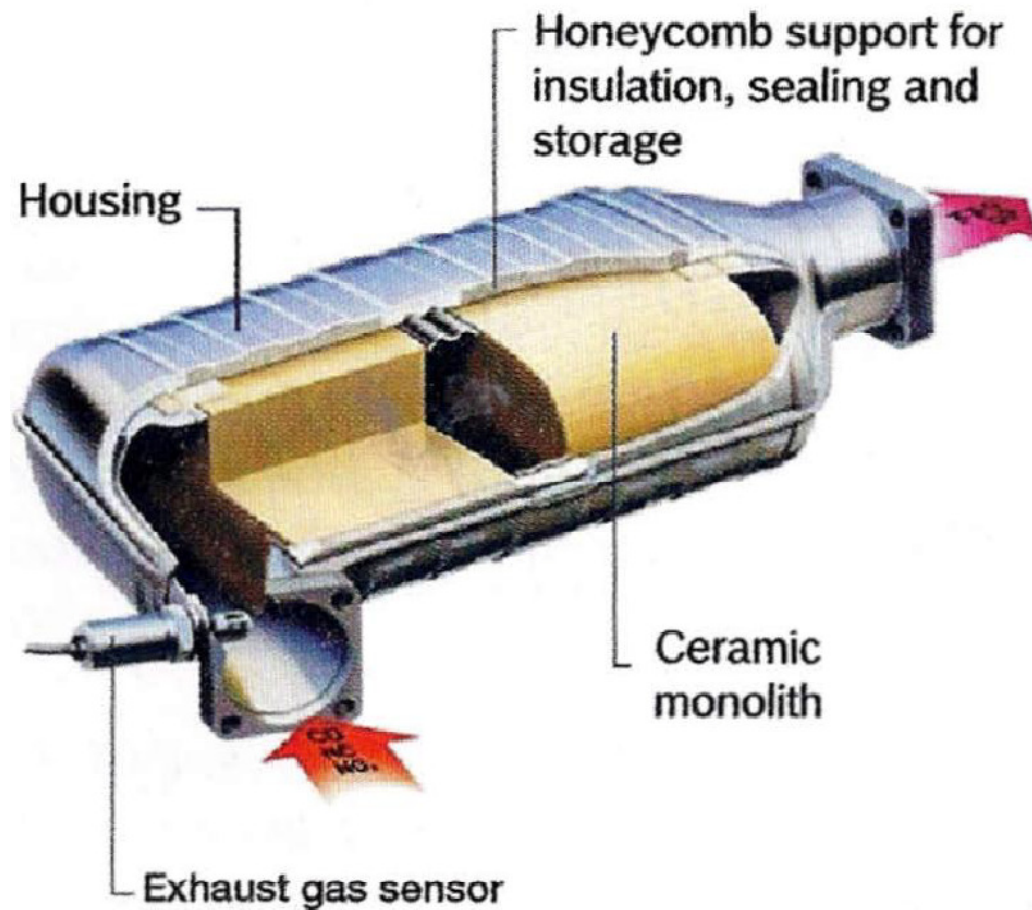


Тростепени каталитички конвертор





Каталитички конвертор



□ **Каталитички конвертор** се састоји из следећих елемената:

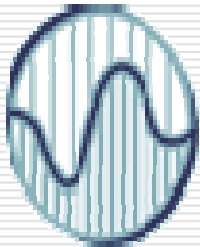
- 1) Кућиште
- 2) Носећег материјала (керамика или метал)
- 3) Каталитички активног слоја (платина и паладијум убрзавају **окисцадију** **НС** и **СО**, а родијум **редукцију** **NOx**)



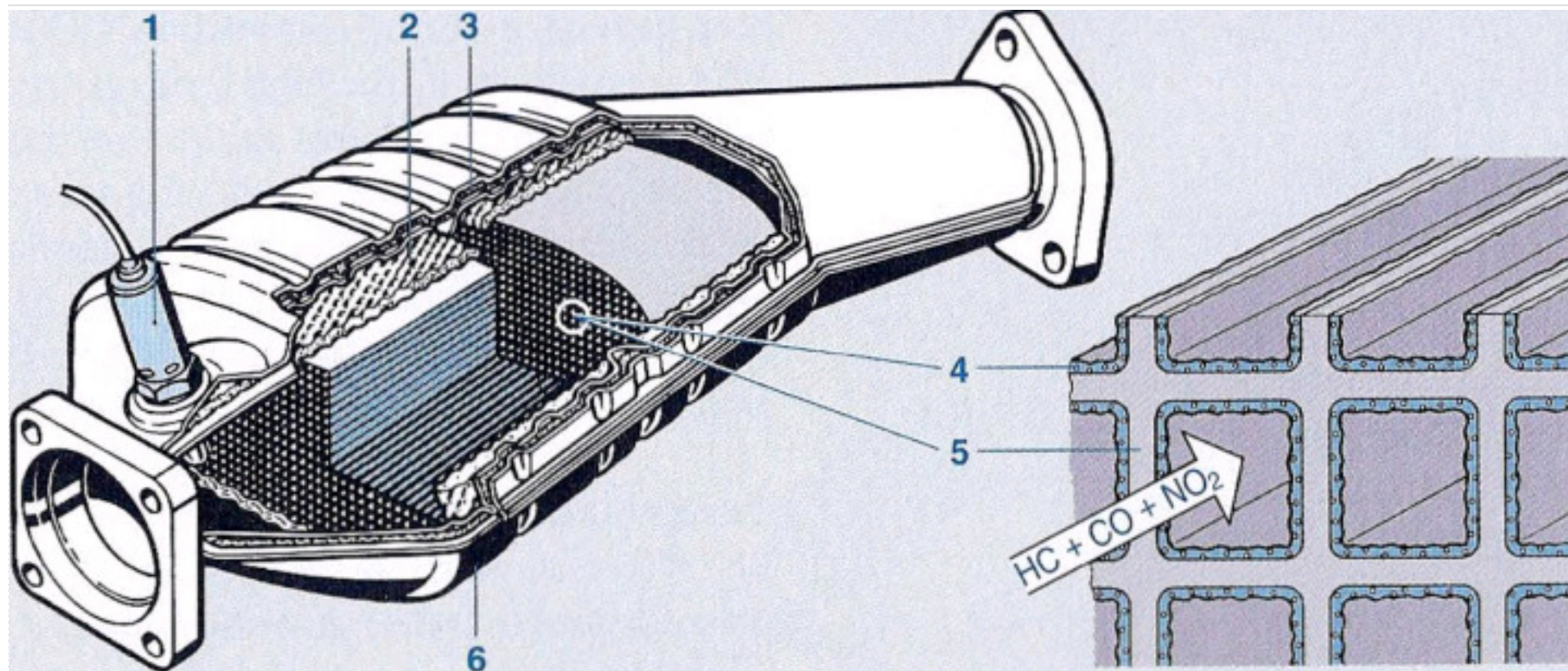
Тростепени каталитички конвертор

Керамичко саће

- ❑ Састоји се од великог броја уских пролаза кроз које пролазе издувни гасови
- ❑ Керамичко саће (магнезијум-алуминијум силикат) има високу отпорност на температуру
- ❑ Остељиво је на механичка напрезања, па је из тог разлога окружено посебном облогом (2) која га учвршћује и поставља у адекватну позицију.
- ❑ Осим овога спречава истицање продуката за сагоревање (врши заптивање)



Тростепени каталитички конвертор

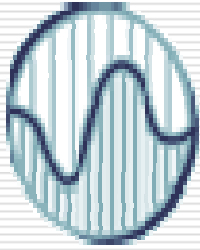




Тростепени каталитички конвертор

Метално саће

- Представља алтернативу керамици
- Израђује се од веома танке металне фолије (0,03-0,05 mm) високо отпорне на темепратуру
- Захваљујући карактеристикама фолије могуће је направити стурктуру са јако великм броје пролаза-отвора што смањује отпор продуктима сагоревања и омогућава рад моторима високих перформанси



Тростепени каталитички конвертор

Активни каталитички слој

- ❑ Керамичка и метална саћа захтевају подлогу - премаз од алуминијум оксида.
- ❑ Овај премаз повећава ефективну површину са фактором 7000
- ❑ Ефективни каталитички премаз садржи племенете метале: платину и паладијум који убрзавају оксидацију CO и HC, као и родијум који убрзава редукцију NOx
- ❑ Садржај племенитих метала у каталитичком конвертору је 1-5 g и зависи од запремине мотора.



Тростепени каталитички конвертор

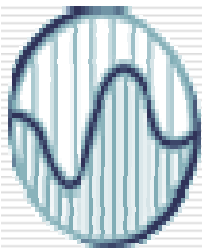
Радни услови

- Да би се одвијао процес оксидације и редукције потребан је одређени ниво активационе енергије који се добије из температуре издувних гасова
- Минимална захтевана радна темепратура је око 350°C
- Оптимална радна температура је 400-800°C
- Опсег од 800-1000°C изазива термално старење конвертора – смањење активне површине
- Темепратуре веће од 1000°C драстично убрзавају старење конвертора
- Темепратуре веће од 1400°C воде физичком оштећењу конвертора - топљење.



Третман издувних гасова током рада са сиромашном смешом (GDI мотори)

- Ниска температура издувних гасова, посебно у режиму рада на делимичним оптерећењима компликује третман издувних гасова.
- Висок ниво кисеоника код сиромашне смеше омогућава лаку оксидацију HC и CO, док је смањење NOx – готово немогуће.
- Примењује се принцип складиштења где се NO оксидује у NO₂ у контакту са платином и абсорбује се у форми нитрата NO₃ уз помоћ алкалних компонената, у овом случају баријума.
- Регенерација се врши у режиму рада са богатом смешом



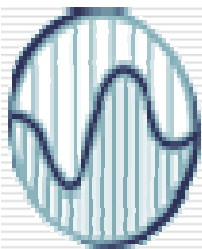
NOx акумулаторски каталитички конвертор

- Ниска температура издувних гасова, посебно у режиму рада на делимичним оптерећењима компликује третман издувних гасова.
- Висок ниво кисеоника код сиромашне смеше омогућава лаку оксидацију HC и CO, док је смањење NOx – готово немогуће.
- Током рада са сиромашном смешом тростепени каталитички конвертор не може да конвертује NOx
- NOx акумулаторски каталитички конвертор је по конструкцији идентичан тростепеном каталитичком конвертору.
- Поред слоја палтине, паладијума и родимијума овај конвертор има и специјалне адитиве способне да акумулира NOx

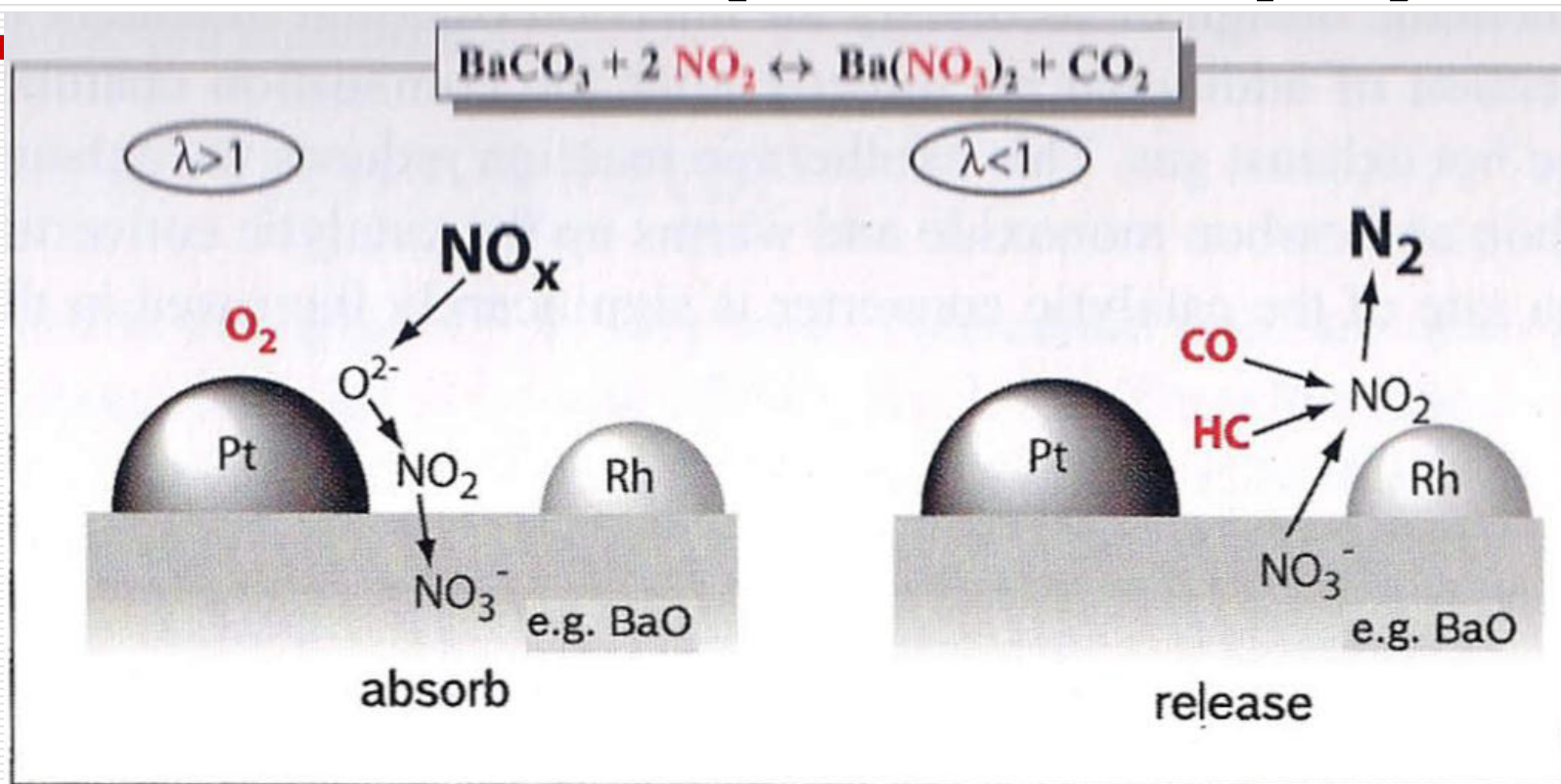


NOx акумулаторски каталитички конвертор

- Типични материјали у овом конвертору су потазијум, калцијум, цирконијум и баријум.
- Примењује се принцип складиштења где се NO оксидује у NO₂ у контакту са платином и абсорбује се у форми нитрата NO₃ уз помоћ алкалних компонената, у овом случају баријума.



І ретман издувних гасова током рада са сиромашном смешом (GDI мотори)



Nox storage medium BaCO_3
additionally present in washcoat

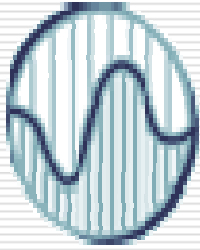
Temperature window:
250 - 450°C

Chemical behaviour of SO_x is similar to that of NO_x

However, $\text{Ba}(\text{SO}_3)_2$ is thermally more stable

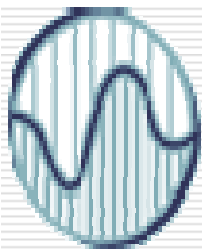
Continuous clogging of the NO_x storage

Contamination

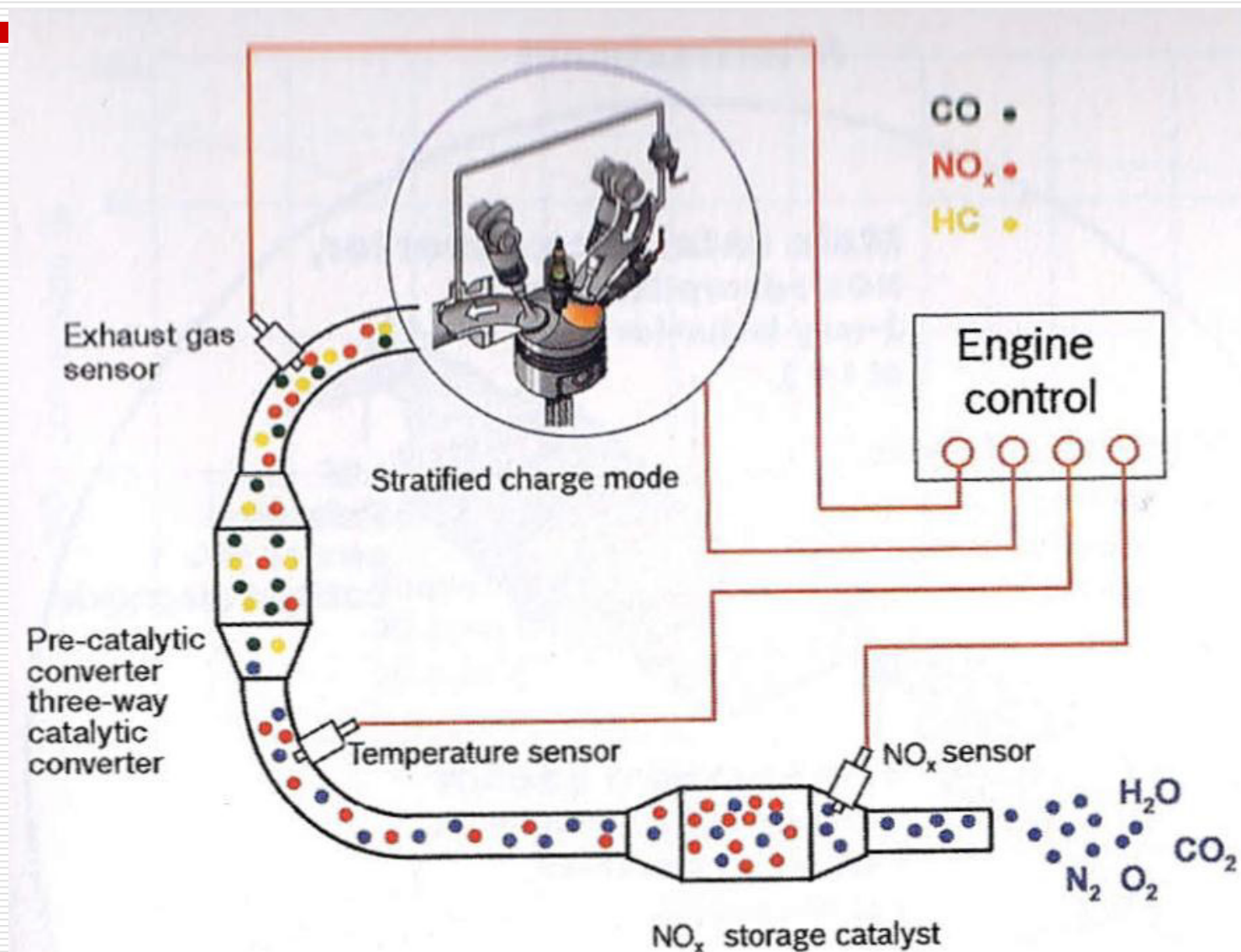


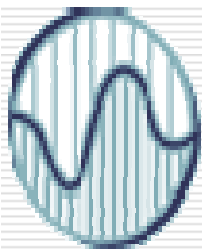
NOx акумулаторски каталитички конвертор

- Засићење акумулатора може се установити на два начина:
 - Прорачунским моделом у ЕУЈ
 - NOx – сензором на излазу из конвертора
- Регенерација се врши у режиму рада са богатом смешом.
- Провера да ли је регенерација спроведена:
 - Прорачунским моделом у ЕУЈ
 - λ – сензором на излазу из конвертора
- Оптимална радна темепература је 300-400°C.
- Ово омогућава удаљенију позицију у систему.

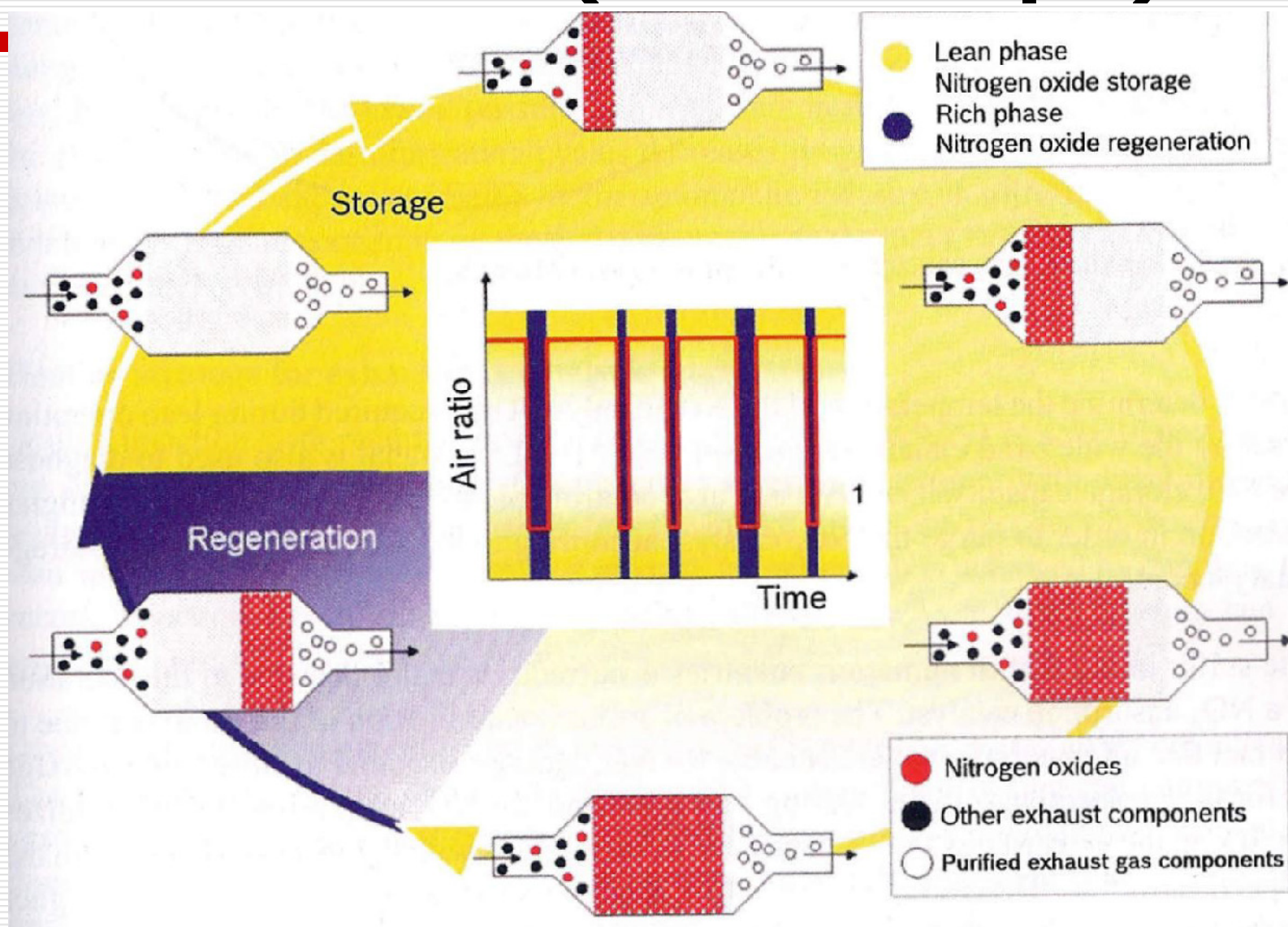


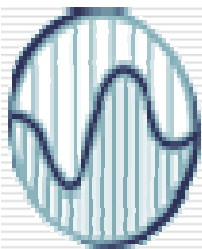
І ретман издувних гасова током рада са сиромашном смешом (GDI мотори)



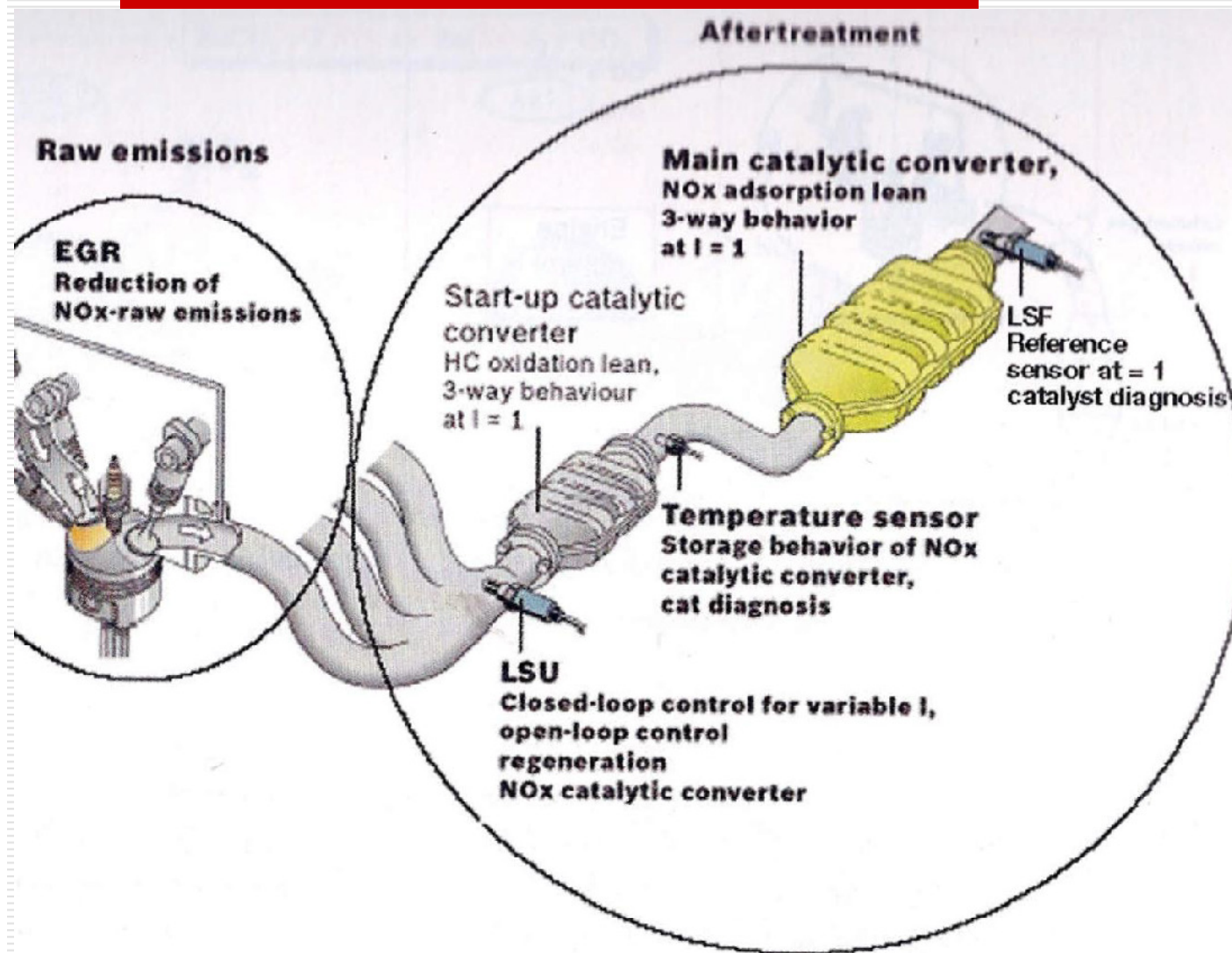


І ретман издувних гасова током рада са сиромашном смешом (GDI мотори)



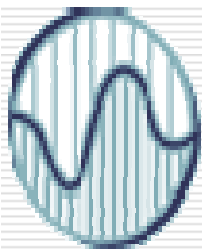


Гретман издувних гасова током рада са сиромашном смешом (GDI мотори)

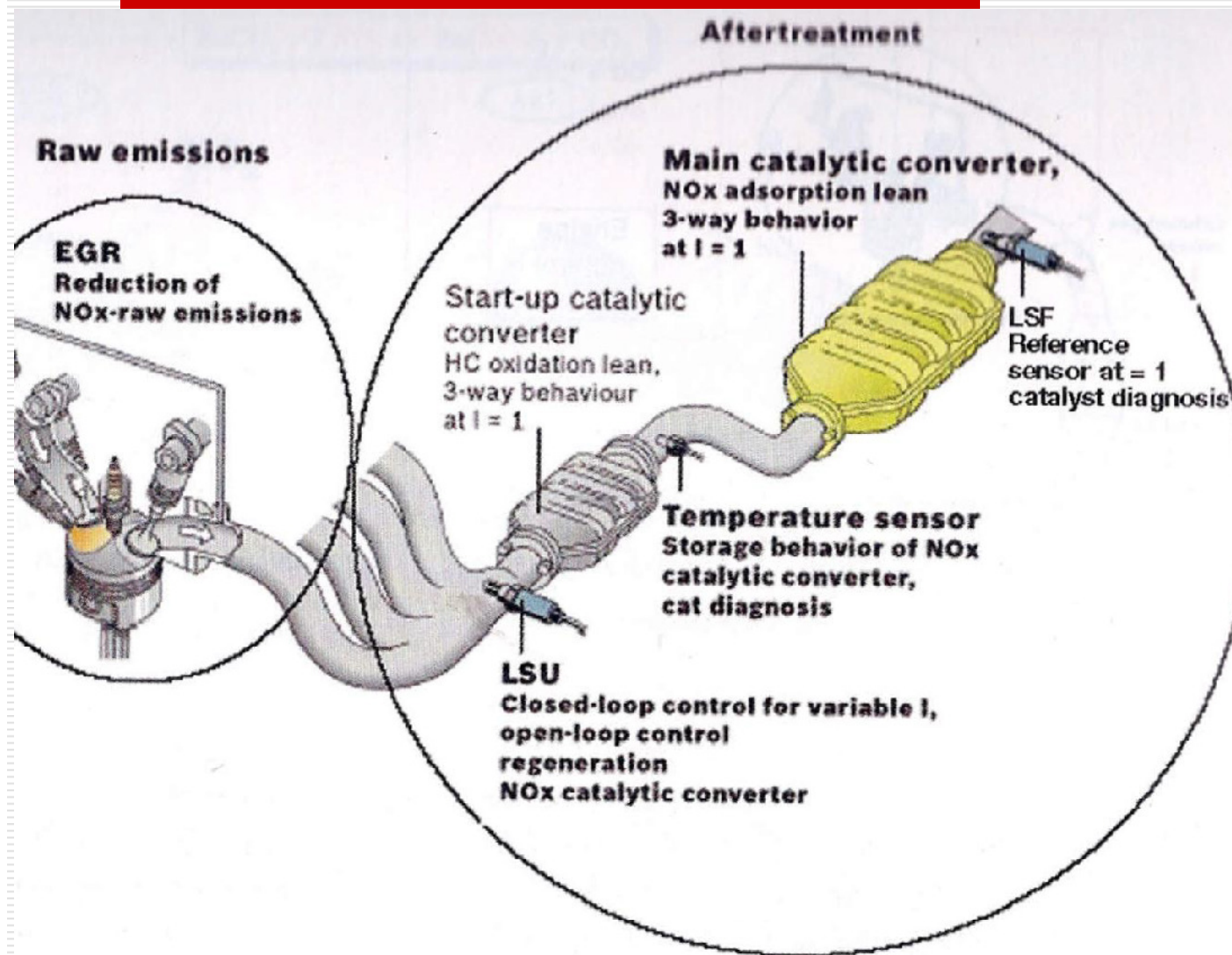


Систем поседује EGR, тростепени каталитички конвертор намењен пре свега за елиминацију HC и рад са стехиометријском смешом.

Други (главни) катализатор садржи тростепени каталитички конвертор и акумулаторски NOx конвертор.



Претман издувних гасова током рада са сиромашном смешом (GDI мотори)



Двостепена ламбда сонда LSF намењена је за рад са стехиометријском смешом.

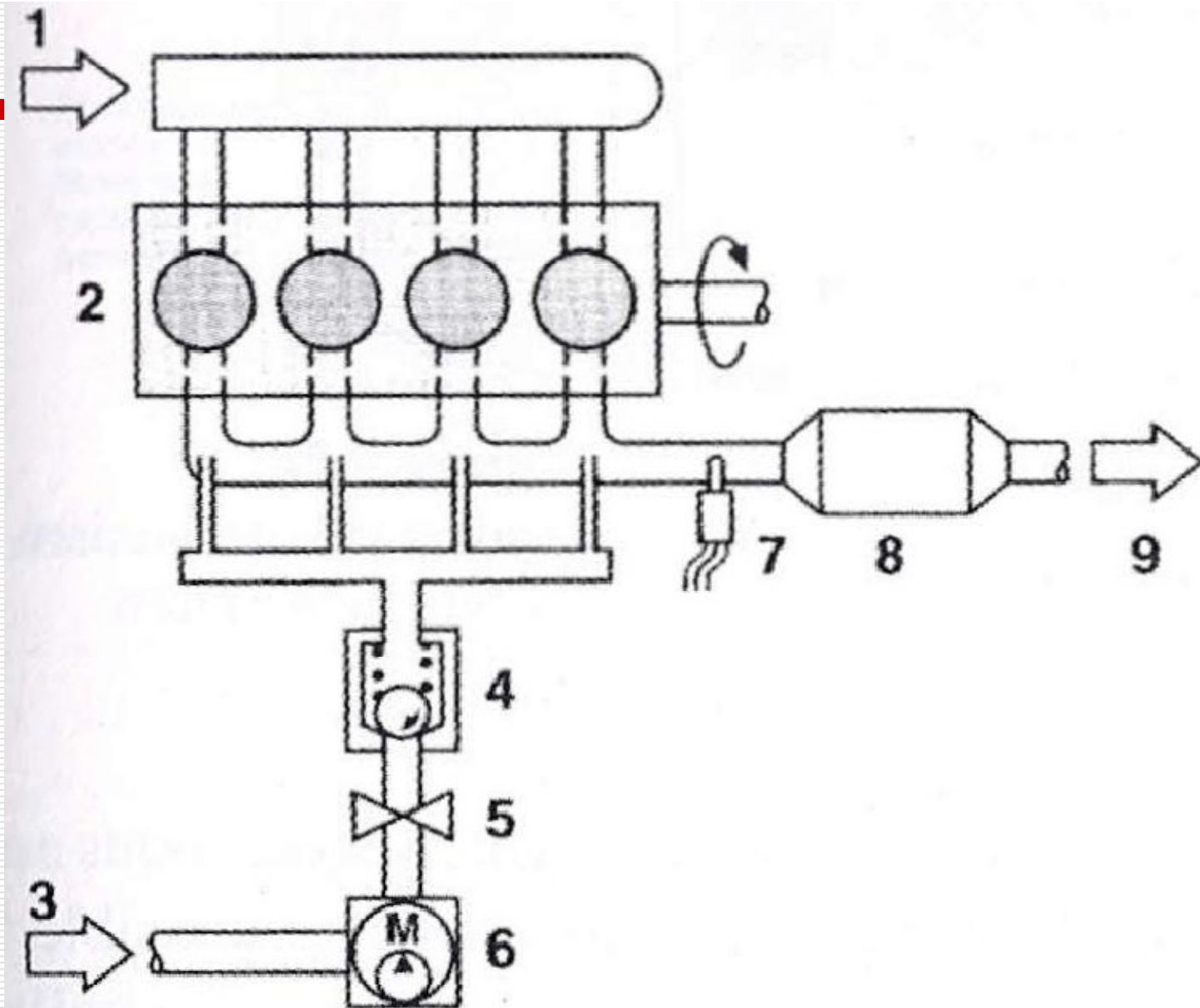
Сензор темепратуре намњен је за дијагностику рада првог конвертора.

Друга ламбда сонда LSU је намењена за рад са сиромашном смешом, као и у режиму регенерације аку. конв. (NOx).



Топлотни третман издувних гасова - Секундарни ваздух

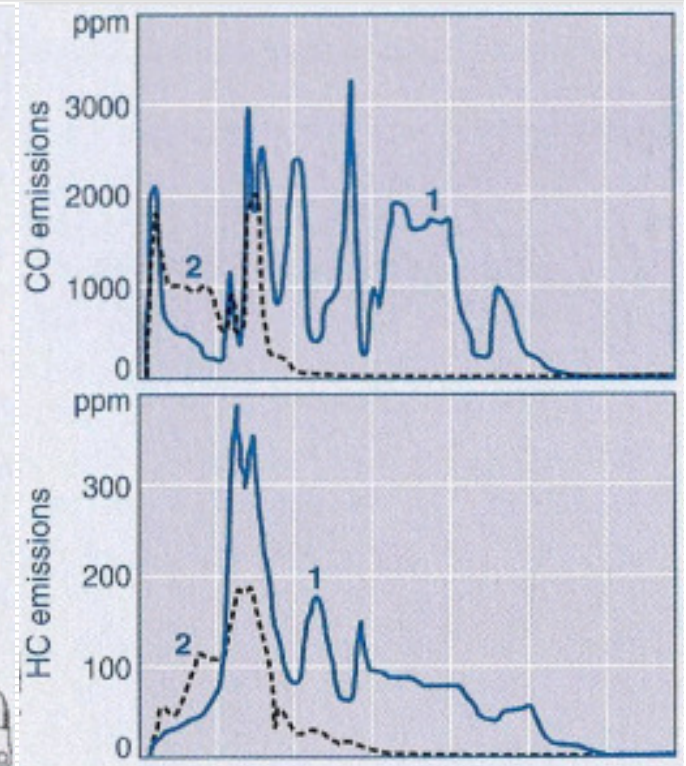
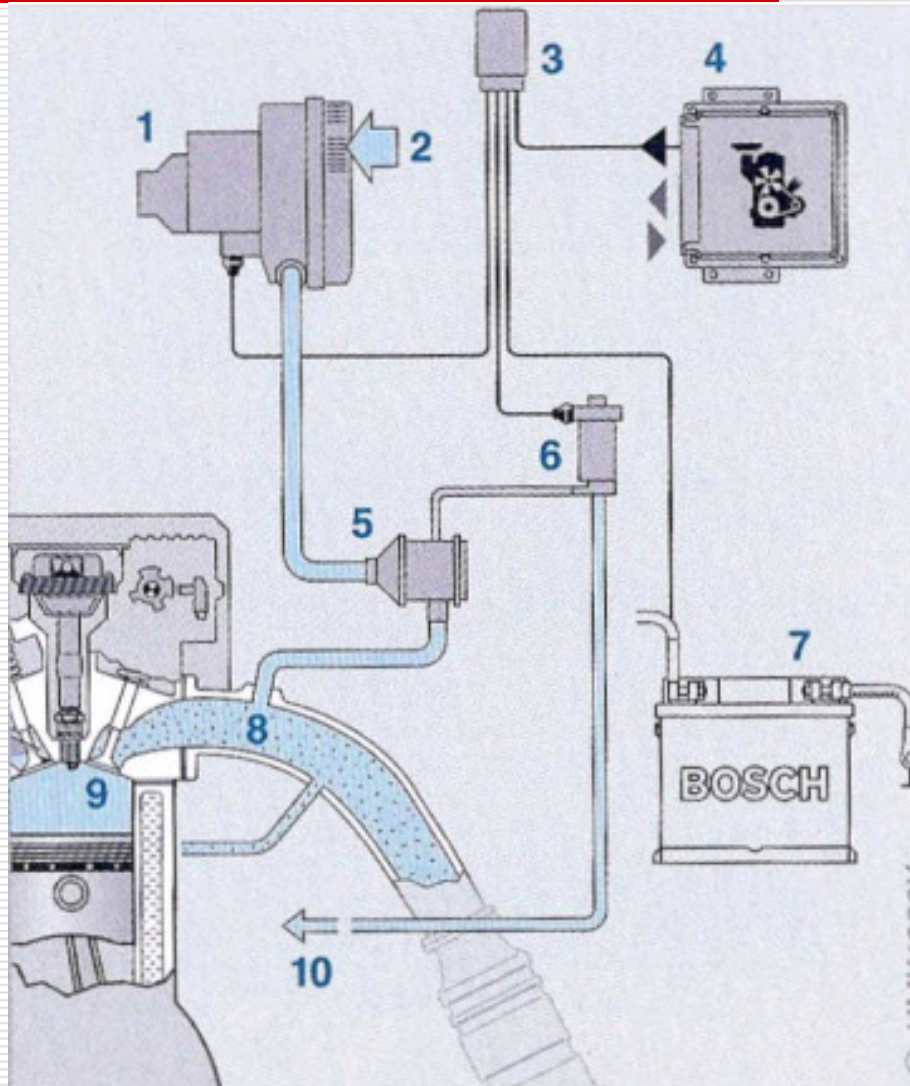
Редукује
НС и СО и
загрева
каталитички
конвертор.

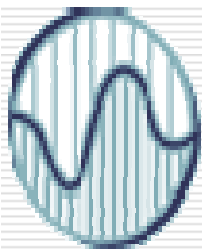




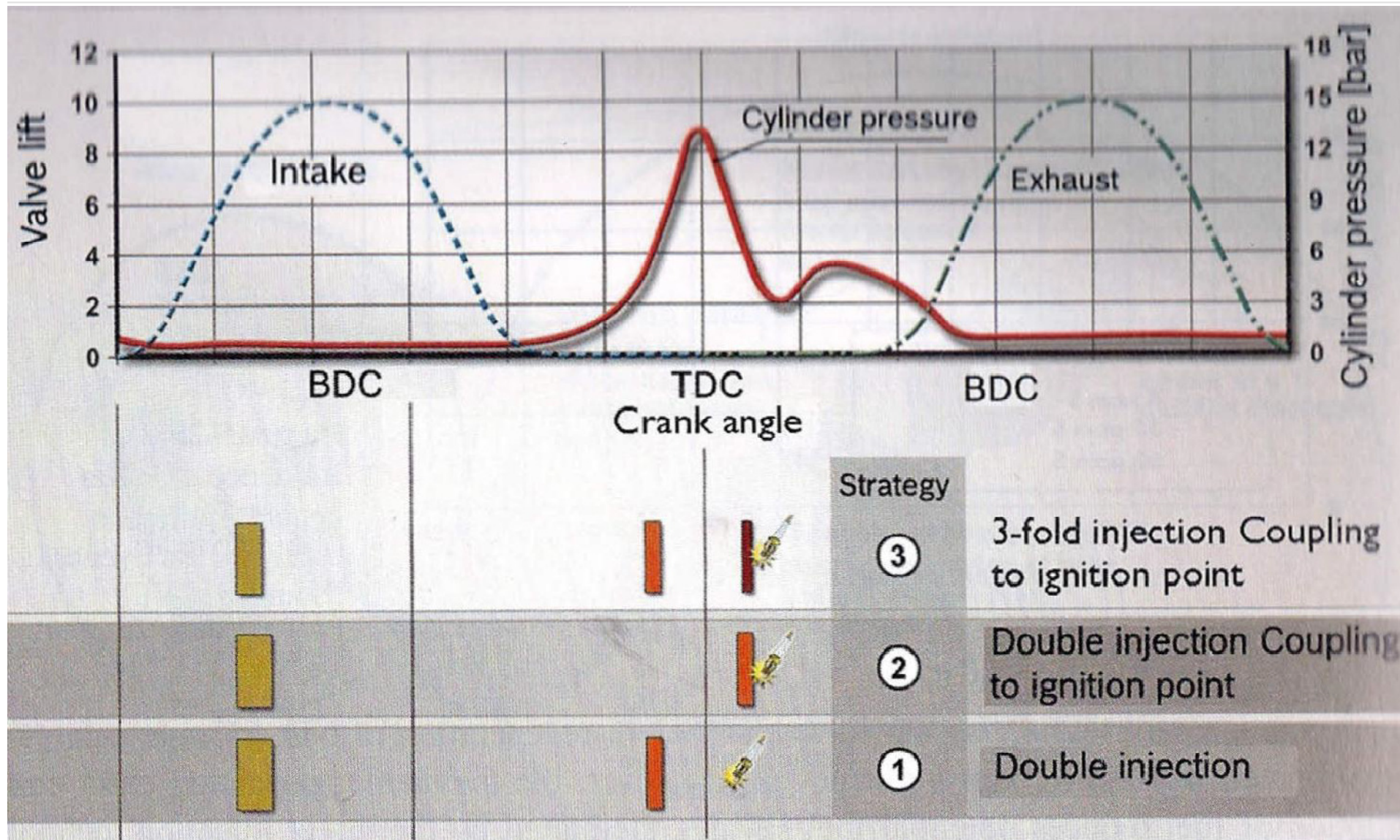
Топлотни третман издувних гасова - Секундарни ваздух

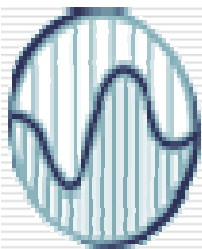
Редукује
НС и СО и
загрева
каталитички
конвертор.



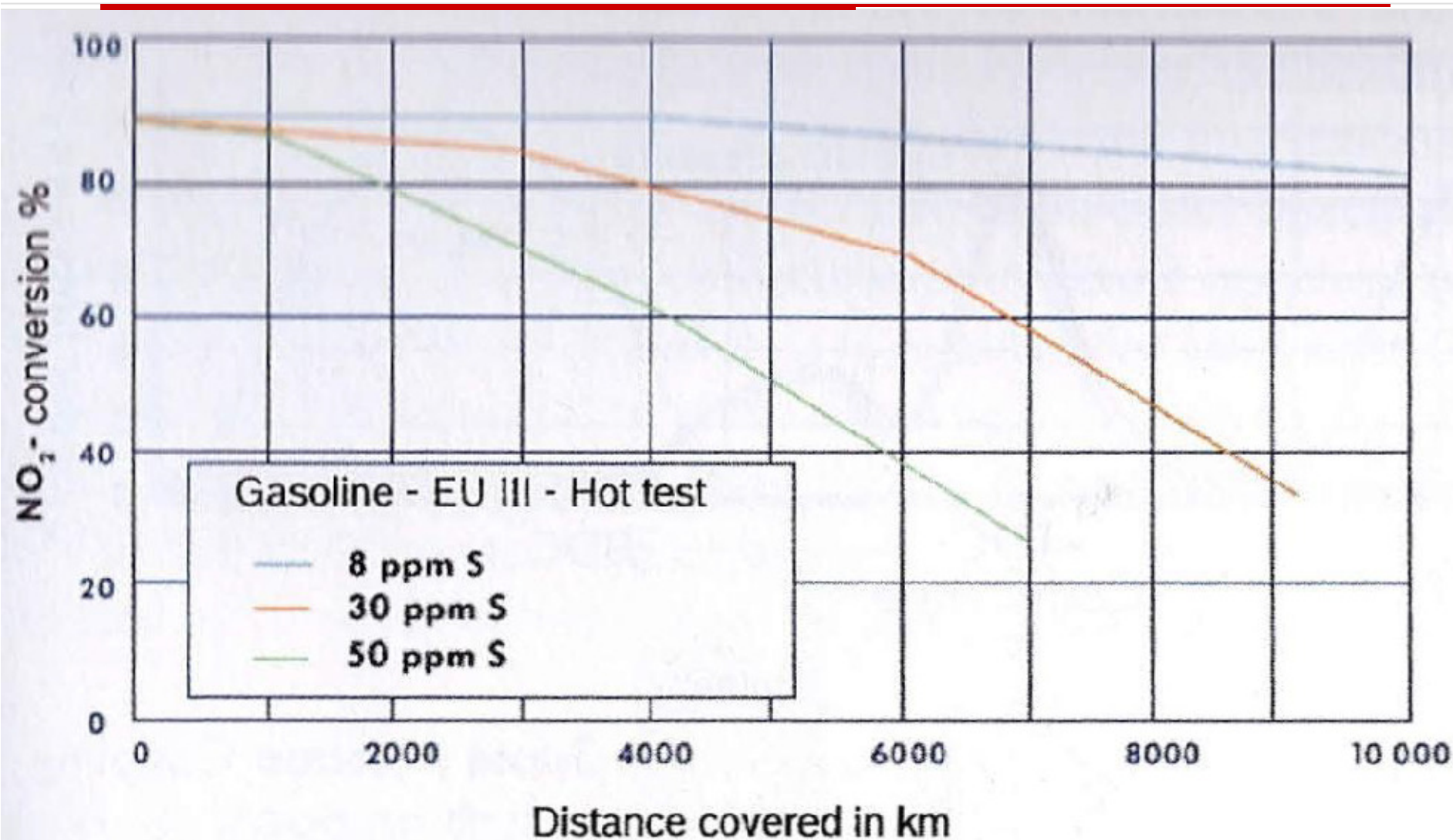


Грејање каталитичког конвертора





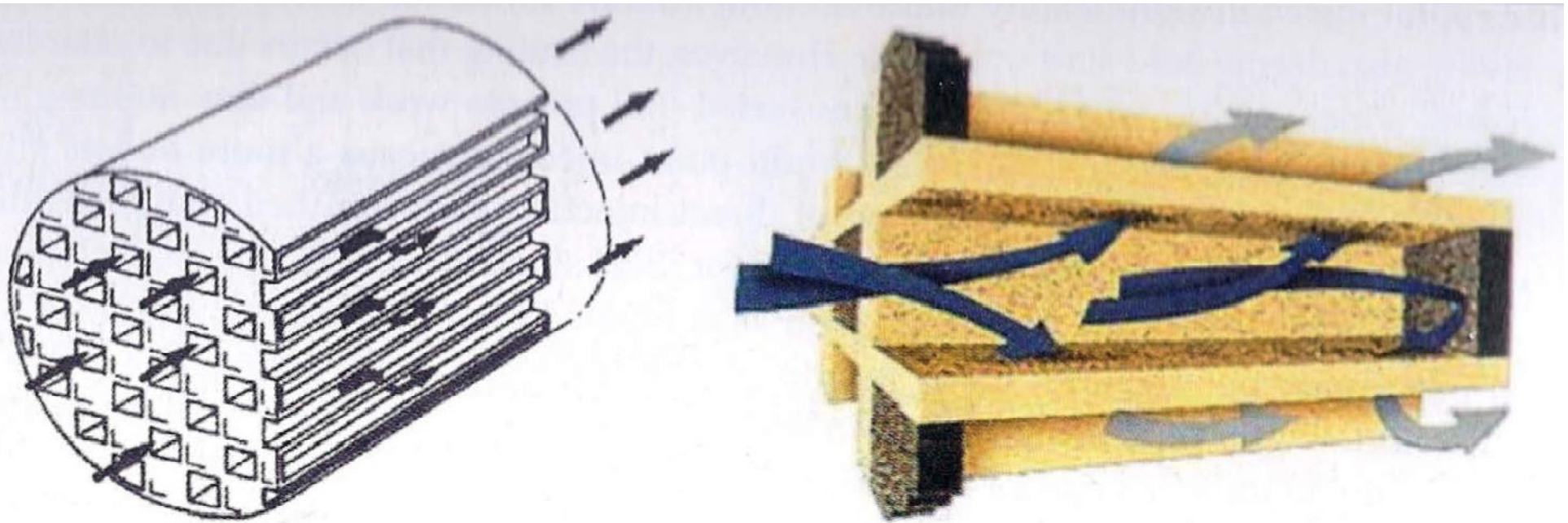
Проблем сумпора у третману издувних гасова





Уклањања честица чађи из издувних гасова

- Примењују се слична решења као код дизел мотора. Најчешће се израђују од силицијум карбида са порама од $9-35 \mu m$.





Конфигурација каталитичких конвертора

