

Kombinirana uporaba avtodiagnostike in meritev izpušnih plinov vozil z bencinskim motorjem

Povzetek

Teoretična zakonitost, da bencinski motorji delujejo najčisteje pri stehiometričnem razmerju med zrakom in gorivom nam daje povod za teoretični preračun izpušnih plinov pri popolnem izgorevanju. Iz teh osnov lahko nato izpeljemo najrazličnejše primere nepravilnega izgorevanja motorja in s tem možnih napak na vozilu, ki zanimajo vse serviserje vozil. Tako lahko ob pravilnem prepoznavanju napak na vozilu le-te hitro in učinkovito odpravimo, izpušne pline motorja pa ponovno pripeljemo v zakonske okvire. S tem si ne prihranimo le časa pri odkrivanju vzrokov za nepravilno delovanje vozila, ampak tudi čas za popravilo vozila, lastniku vozila pa morebitne nepotrebne stroške. Še najbolj pa je pri vsej stvari pomemben osebni vidik avtoserviserja, da lahko lastniku nepravilno delujočega vozila povsem natančno odgovori, kakšna napaka se je v vozilu pojavila in kako se jo da odpraviti.

Uvod

Bencinski motorji z notranjim izgorevanjem po teoriji delujejo najboljše in najčisteje pri stehiometričnem razmerju zrak : gorivo je enako 14,7 : 1. V praksi pa vemo, da motor skoraj nikoli ne deluje pri tem razmerju in da je to le tista točka, h kateri se vsa motorna regulacija usmerja. Da bi lahko razumeli, kaj se v bencinskih motorjih z notranjim zgorevanjem dogaja med popolnim zgorevanjem goriva in po njem, moramo poznati nekaj teoretičnih zakonitosti kemičnih procesov pri zgorevanju .

Teoretični preračuni

Stehiometrično razmerje

To je masno **razmerje zrak-gorivo** (RZG), ki znaša 14,7 : 1. To je tista točka RZG, pri kateri motor z notranjim izgorevanjem sam proizvaja najmanj škodljivih karcinogenih ogljikovodikov (CH), obenem pa proizvaja največ dušikovih oksidov (NO_x), ki imajo neprijetne vonjave. Pri tej vrednosti mešanice je razmernik zraka lambda (λ) enak 1.

$$[1] I = \frac{RZG_{dejanski}}{RZG_{steh}}, \text{ razmernik zraka}$$

Pri vrednosti RZG manjši od 14,7:1 govorimo o bogati ali mokri mešanici, v obratni smeri pa o revni ali suhi mešanici. Delovanje motorja v suhih razmerah je zelo nevarno za pregrevanje in poškodovanje drsni delov pri večjih obremenitvah.. Motor v teh razmerah deluje z zmanjšano močjo, ima veliko prostega kisika in se pri zgorevanja prekomerno greje, ker izpušnimi plini ne moremo dovolj ohlajati bata, ni goriva, ki bi drsne površine bata in ventilov še dodatno mazal med delavnim taktom. Takšno delovanje motorja je primerno

samo za delovanje v prostem teku motorja in pri manjših obremenitvah.

Drugače pa motorji vedno delujejo z nekoliko bogato mešanico, saj tako znižujejo temperaturo detonacij zaradi nepopolnega zgorevanja, zmanjšujejo gretje motorja in dodatno mažejo njegove drsne površine.

Za razumevanje dogajanja pri stehiometričnem razmerju, je potrebno najprej določiti volumske deleže posameznih elementov v takšni mešanici.

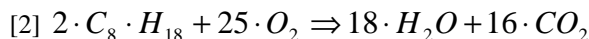
Ker vemo, da je v zraku 20,8 % kisika (O₂), 0,2 % ogljikovega dioksida (CO₂) in 79 % dušika (N₂), lahko izračunamo dejanske volumske procente sesane stehiometrične mešanice.

Zrak (14,7 delov)	Gorivo (1 del)	Zmes (15,7 delov)
$V_{N_2} = 79\%$		$V_{N_2} = 73,97\%$
$V_{O_2} = 20,8\%$	$+ V_{HC} = 100\% \Rightarrow$	$V_{O_2} = 19,48\%$
$V_{CO_2} = 0,2\%$		$V_{CO_2} = 0,187\%$
		$V_{HC} = 6,37\%$

Preračun za 100 oktansko gorivo

V preračunu je upoštevana predpostavka, da pride do popolnega zgorevanja goriva popolnega zgorevanja goriva v delavnem taktu motorja in popolna poraba kisika pri tem. Tako dobimo maksimalno vrednost CO₂ pri takšnem zgorevanju, ki nam bo kasneje služila kot izhodišče za nadaljnje raziskave.

$$m_{zrak} = 100g$$
$$m_{O_2} = 19,48g$$
$$M_{O_2} = 32g / mol$$
$$M_{CO_2} = 44g / mol$$



Od tu naprej potrebujemo število molov CO₂ (n_{CO_2}) v izpušnih plinih po porabi enega mola kisika po zgornji kemijski enačbi za verižni oktan.

$$[3] \frac{n_{O_2}}{n_{CO_2}} = \frac{25}{16} \Rightarrow$$
$$[4] n_{CO_2} = \frac{16}{25} \times n_{O_2} = \frac{16}{25} \times \frac{m_{O_2}}{M_{O_2}} =$$
$$= \frac{16 \times 19,48g \cdot mol}{25 \times 32g} = 0,39mol$$
$$[5] m_{CO_2} = n_{CO_2} \times M_{CO_2} =$$
$$0,39mol \times 44g / mol = 17,14g$$

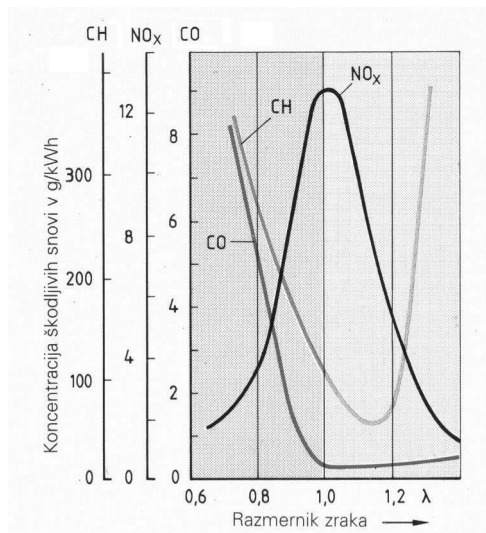
V predpostavki je bilo vzeto masno razmerje zraka enako volumskemu in iz tega vidimo, da je pri 100 oktanskem bencinu maksimalni volumski procent CO₂ enak 17,14%.

100 oktansko gorivo	17,14 %vol
98 oktansko gorivo	16,8 %vol
95 oktansko gorivo	16,28 %vol
V gorivu sami CH (125oktansko)	21,4 %vol

Dejanske razmere na motorju

Dejanske razmere na motorjih se od zgornjih podatkov nekoliko razlikujejo saj v praksi v večini primerov prihaja do nepopolnosti zgorevanja in pri tem do preostanka neporabljenega kisika, ogljikovodikov, ogljikovega dioksida in nepoznatih dušikovih spojin.

Vse proizvajalce motorjev največkrat zanima predvsem točka največje moči motorja, ki pa nastopi pri $\lambda=0,9$. To je točka RZG, h kateri regulacijsko-krmilne naprave vseskozi usmerjajo svoje delovanje. Motorji imajo v tej točki ne samo največjo moč na porabljeno gorivo, ampak tudi najmanjšo delavno temperaturo. Izpušni plini pa se še lahko "očistijo" v tristeznem katalizatorju.



Slika 1: Vsebnosti izpušnih plinov pri različnih vrednostih λ

Iz zgornje slike razberemo, da imajo pri pravilno delujočem motorju, pri $\lambda=0,9$ izpušni plini naslednje vrednosti:

CO	1,5	%vol
O ₂	3,5	%vol
CH	200	ppm
NO _x	8	%vol
CO ₂	nad 10	%vol

Tabela 1: Vrednosti izpušnih plinov pri $\lambda=0,9$ pred katalizatorjem pri dobrem delovanju vozila.

Te vrednosti so zelo previsoke za normalno uporabo takšnih motorjev v urbanih okoljih, saj imajo veliko preveč strupenih snovi. Izpušni plini iz motorja morajo pri nas že od leta 1993 obvezno preiti katalizator, pri tem

pa seveda obvezno spremenijo svojo volumsko sestavo. Poveča pa se tudi temperatura izpušnih plinov.

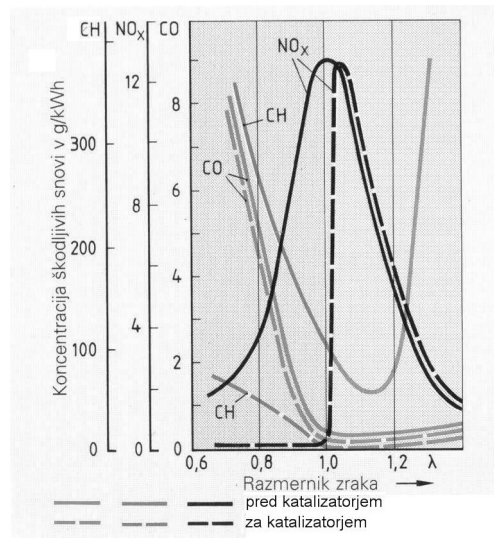
Tristezni katalizatorji

Tristezni katalizatorji so dobili ime po svojem tristopenjskem spreminjanju izpušnih plinov in sicer:

1. redukcija dušikovih oksidov v dušik in kisik: $2\text{NO}_x \rightarrow x\text{O}_2 + \text{N}_2$,
2. oksidacija strupenega ogljikovega oksida v nestrupen, a za naravo škodljiv, ogljikov dioksid: $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$,
3. oksidacija karcinogenih ogljikovodikov v ogljikov dioksid in vodo: $2\text{C}_x\text{H}_y + (2x+y/2)\text{O}_2 \rightarrow 2x\text{CO}_2 + y\text{H}_2\text{O}$.

Iz teh enačb sledi, da za dva volumska dela CO potrebujemo en volumski del O₂ da dobimo za človeka neškodljiv CO₂. To pomeni, da za pretvorbo enega dela CO potrebujemo polovico manj kisika. Nadalje vidimo, da brez poznavanja natančnih enačb goriva (C_xH_y) ne moremo ugotoviti natančnih potreb kisika za popolno reakcijo in porabo goriva, a se pri tem ne obremenjujemo preveč, saj pri še tako slabem zgorevanju, kjer je vrednost CH-jev tudi več kot 500ppm, se le to pri celotnem volumnu zraka ne pozna niti za desetinko promila. To pa je zanemarljivo glede na ostale procente v zmesi.

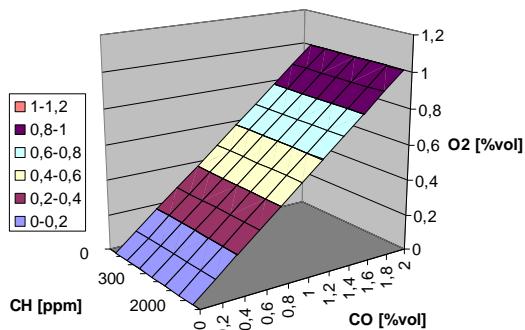
Zanimajo nas še dušikovi oksidi, ki pa imajo zelo zanimivo lastnost redukcije kisika. Sproščeni kisik se nato porablja pri oksidaciji CO. Takšno ugodno sestavo in reakcije pa dobimo le v ozkem območju delovanja motorja $\lambda=0,99-1,0$. Ta točka regulacije pa je tudi ciljna točka delovanja motorja glede izpušnih plinov na izhodu iz katalizatorja. Kako dobro deluje regulacija in vsi vitalni deli motorja pa hitro vidimo pri dejanski meritvi izpušnih plinov.



Slika 2: Primerjava izpušnih plinov pred in za tristeznim katalizatorjem

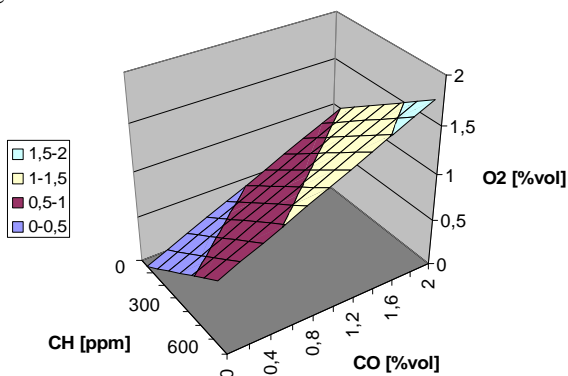
Na grafu lahko povsem natančno razberemo dejanske spremembe izpušnih plinov v katalizatorju in katere reakcije v katalizatorju imajo prednost. Vidi se, da ima

redukcija dušika absolutno prednost pred oksidacijo do $\lambda=1,0$. Po tej točki pa redukcija ne poteka več. Oksidacija CH ima veliko prednost pred oksidacijo CO. Iz vsega tega vidimo, da za nizke volumske procente CO potrebujemo že v regulaciji delovanja motorja čimnižje vrednosti, saj se tudi v katalizatorju ne morejo znižati pod določeno mejo, če so že pri vstopu v katalizator vrednosti previsoke.



Slika 3 : Potrebne volumske količine plinov za oksidacijo CO in CH v katalizatorju

Iz slike se dejansko vidi, da vsebnosti CH v izpušnih plinih nima prav nobenega vpliva na same dejanske meritve vsebnosti ostalih plinov za katalizatorjem (seveda ob predpostavki da so samo preprosti CH, kar pa v praksi ni nikoli realno). Ob upoštevanju zakonitosti sestave CH-jev v enačbi [2], pa lahko izdelamo naslednje grafe.



Slika 4 : Dejansko potrebne volumske količine O₂ pri izmerjenih vrednostih plinov CO in HC pred katalizatorjem

Potreben kisik za reakcije v katalizatorju

CO [%vol]	CH [ppm]	0	100	200	300	400	500	600
0	0	0	0,11875	0,2375	0,35625	0,475	0,59375	0,7125
0,2	0,1	0,21875	0,3375	0,45625	0,575	0,69375	0,8125	0,93125
0,4	0,2	0,31875	0,4375	0,55625	0,675	0,79375	0,9125	1,03125
0,6	0,3	0,41875	0,5375	0,65625	0,775	0,89375	1,0125	1,13125
0,8	0,4	0,51875	0,6375	0,75625	0,875	0,99375	1,1125	1,23125
1	0,5	0,61875	0,7375	0,85625	0,975	1,09375	1,2125	1,33125
1,2	0,6	0,71875	0,8375	0,95625	1,075	1,19375	1,3125	1,43125
1,4	0,7	0,81875	0,9375	1,05625	1,175	1,29375	1,4125	1,53125
1,6	0,8	0,91875	1,0375	1,15625	1,275	1,39375	1,5125	1,63125
1,8	0,9	1,01875	1,1375	1,25625	1,375	1,49375	1,6125	1,73125
2	1	1,11875	1,2375	1,35625	1,475	1,59375	1,7125	1,83125

Tabela 2: Numerične vrednosti potrebnega kisika pred katalizatorjem

Tu dejansko vidimo, da je končna vsebnost CH v izpušnih plinih zelo odvisna tudi od količine kisika v izpušnih plinih pred katalizatorjem. V realnosti pa katalizator predela največ okoli 500 ppm in ne več. Pri večjih vrednostih CH v izpušnih plinih je v motorjih prisotna napaka in katalizator bo zaradi prekomernega segrevanja zelo kmalu prenehal opravljati svojo funkcijo zaradi pregretja in taljenja nosilne keramične konstrukcije. Vseeno pa je še daleč dejanska poraba kisika v procesu izgoravanja glede na dejanske znane enačbe izgoravanja in reakcije v katalizatorju. Napake se pojavijo zaradi nepoznavanja dejanske strukture goriva, ki bistveno vpliva na dejanske kemijske procese, ki se odvijajo pri samem zgorevanju goriva in kasneje predelave v samem katalizatorju.

Meritve izpušnih plinov vozil

Meritve izpušnih plinov je najbolje izvajati pred katalizatorjem, saj tako najlažje odstranimo možnost njegovega nepravilnega delovanja. Tako dobimo dejanske vrednosti izpušnih plinov iz motorja, ki pa jih potrebujemo pri odkrivanju kakovosti delovanja regulacije vozila. Potrebujemo vseh pet podatkov, ki jih pri meritvi izpušnih plinov lahko dobimo brez obremenilnega testa vozila.

Najboljša kontrola delovanja vozila je vrednost CH v izpušnih plinih. Kadar so vrednosti pred katalizatorjem višje od 400ppm je delovanje motorja že zelo vprašljivo in pri tem lahko sklepamo na napačno zgorevanje ali na prekomerno porabo mazalnih olj. Drugi pokazatelj delovanja vozila je razmerje plinov CO – O₂ pred katalizatorjem, kjer mora biti razmerje najmanj 2-1 v korist kisika.

Tretji pokazatelj kakovosti izgoravanja je volumska vsebnosti izpušnih plinov s CO₂ za katalizatorjem, kjer je pri hladnem vozilu vsebnost do 10 %, pri najbolj dobrem zgorevanju in pri vseh ostalih porabljenih zračnih komponent, pa v realnosti dobimo največ do 15,0-15,2%. Četrty pokazatelj kakovosti izgoravanja pa je izračunani faktor λ (zračno število), ki je dejansko računaska vrednost, izračunana po Brettschneiderju:

$$I = \frac{[CO_2] + \frac{[CO]}{2} + [O_2] + \left(\frac{H_{cv}}{4} \times \frac{3,5}{3,5 + \frac{[CO]}{CO_2}} - \frac{[O_{cv}]}{2} \right) \times ([CO_2] + [CO])}{\left(1 + \frac{H_{cv}}{4} - \frac{O_{cv}}{2} \right) \times ([CO_2] + [CO]) + K_1 \times [HC]}$$

- [] koncentracije v % vol, tudi za CH
- K₁ konverzijski faktor za CH (vrednost je 8)
- H_{cv} razmerje vodik-ogljik goriva (1,7261 za 95okt)
- O_{cv} razmerje kisik-ogljik goriva (0,0175 za 95okt)

Zakonska vrednost λ za meritve za katalizatorjem je postavljena v meje od $\lambda = 0,997-1,003$. Ker pa tu merimo pline pred katalizatorjem, je zračno število λ zaradi velikega deleža kisika v zraku vedno višje od 1,1.

Na podlagi meritev nato izdelamo tabelo, v kateri lahko strnemo meritve pri najrazličnejših napakah delovanja sistemov regulacije in doziranja.

Lega meritve	Meritev v prostem teku				Meritev pri povišanih vrtljajih					
	CO [%vol]	CO ₂ [%vol]	O ₂ [%vol]	lambda	CO [%vol]	CO ₂ [%vol]	O ₂ [%vol]	HC [ppm]	lambda	
pred	0,5-1,5	več od 12	0,7-3,5	<1,1	do 1,0	nad 13	do 2,0	manj od 400	nad 1,1	dobro delovanje regulacije
za	0,0 - 0,05	nad 14,5	do 0,1	0,97-1,03	0,0 - 0,05	nad 14,5	do 0,1	tudi do 100	0,97-1,03	katalizator dober
za	0,5-1,5	več od 12	0,7-3,5	<1,1	do 1,0	nad 13	do 2,0	manj od 400	nad 1,1	katalizatorja ni ali ne deluje
pred	1,0-4,0	pod 12	2,0-4,0	nad 1,3	0,5-2,0	pod 12	2,0-4,0	do 1000	nad 1,3	ni signala kisikove sonde
za	do 3,0	nad 12	0,0-0,1	pod 0,9	do 3,0	nad 12	0,0-0,1	do 1000	pod 0,9	(zelo vroč kat)
pred	2,5-12	pod 10	do 0,5	pod 0,8	2,5-12	pod 10	do 0,5	nad 1000	pod 0,8	previsoka vrednost kisikove sonde konstantna
za	do 10	nad 12	0,0	pod 0,9	do 10	nad 12	0,0	nad 1000	pod 0,9	(zelo vroč kat)
za	0,0 - 0,05	nad 14,5	0,0-0,2	0,97-1,03	0,35-0,9	nad 14	0,0-0,3	do 200	pod 0,95	merilec pretoka zraka, temp. motorja ali zraka
za	0,0 - 0,05	nad 14,5	0,0-0,2	0,97-1,03	1,5-4,0	nad 13	0,0-0,1	do 200	pod 0,95	napaka na regulaciji (kot lopute)
za	0,0 - 0,05	nad 13	1,5-3,0	nad 1,05	0,0 - 0,05	nad 14	1,5-3,0	pod 100	nad 1,05	napake na dotoku goriva (tlak goriva, šobe)
za	0,6-1,0	nad 13	okoli 1,0	pod 0,95	1,5-5,0	pod 13	0,0-0,1	nad 1500	pod 0,9	napake pri vžigu (svečke, tuljava, koti gredi)

Tabela 3: Izbor nekaterih možnih razlag delovanja motorja pri pregledu dejanske meritve motorja

Ko opravimo meritve, ponavadi ne moremo povsem natančno odgovoriti, kakšna in kje je na avtomobilu napaka, je pa seveda znana tista smer, v kateri iščemo odgovor. Seveda sistem velikokrat deluje pravilno, a takrat največkrat ni zahtev po izvajanju meritev. Diagnoza motorne elektronike in meritve izpušnih plinov se največkrat uporablja pri prisotni napaki v vozilu, še največkrat pa pri neuspešno opravljenih meritvah plinov na tehničnih pregledih vozil. Seveda je tu za odgovor o delovanju vozila potrebno najprej opraviti diagnozo delovanja motorne elektronike in odpraviti najprej prisotne napake. Na podlagi primerjav diagnoze elektronike in izpušnih plinov pa lahko hitreje in natančneje določimo napako.

Temperatura izpušnih plinov

Na koncu vsega ostalega je potrebno dodati še zadnji del možnega odkrivanja napak pri izpušnih plinih. Temperaturni senzori v izpušnih sistemih so velikokrat uporabljeni za dve nalogi. Prva naloga je opozorilni sistem pri pregrevanju katalizatorja;

- dvo stezni katalizator do 750°C,
- tri-stezni na platini bazirani katalizatorji do 900°C,
- tri-stezni na paladiju bazirani katalizatorji pa do 925°C.

Druga naloga temperaturnih senzorjev pa je največkrat tudi uporabljena za spremljanje povečanja temperature izpušnih plinov pri prehodu skozi katalizator. To je še dodatna zaščita kakovosti delovanja regulirnega sistema. Znano je, da bo za 1% CO v izpušnih plinih pred katalizatorjem temperatura v katalizatorju narasla za 100°C. To je še drug način približnega merjenja količine CO v izpušnih plinih.

Zaključek

Če povzamemo zakonitosti kemijskih enačb pri zgorevanju goriva v bencinskem motorju z notranjim zgorevanjem, lahko z veliko verjetnostjo ugotovimo, kako se motor obnaša. Z enostavno meritvijo izpušnih plinov, ki je zakonsko predpisana za motorje vozil in se opravlja tudi na tehničnih pregledih, lahko bistveno skrajšamo čas od nastanka do odkritja napake in na koncu tudi do njene odprave.

Peter Caserman, univ.dipl.inž.str..