

UDK 621.43.068:621.434.12

## Vpliv temperature delovnega zraka in obremenitve na emisijo izpušnih plinov in porabo goriva pri štiriktaktnih Ottovih motorjih z uplinjačem\*

MIRKO ČUDINA

### 1. UVOD

Izpušni plini iz avtomobilskih motorjev sestojijo iz produktov popolnega zgorevanja  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  in  $\text{N}_2$ , ki pride s kisikom iz zraka, ter produktov nepopolnega zgorevanja, kakor so:  $\text{CO}$ , nezgoreli in termično cepljeni nepopolno oksidirani ogljikovodiki, oksidirani ogljikovodiki (aldehidi, organske kisline itd), kondenzirani aromati, dušikovi oksidi ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}_5$ ),  $\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{H}_2$ , žveplove oksidi, oljna megla, svinčeve spojine, saje in trdni delci.

$\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  in  $\text{H}_2$  niso škodljivi za človekovo zdravje, medtem ko imajo druge snovi, v prvi vrsti  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}$ ,  $\text{NO}_x$ , celo zelo strupen učinek na človeški organizem. Poleg strupenega učinka je zanje značilen tudi smrad (npr. aldehidi,  $\text{NO}_2$ ), zaradi česar je vdihavanje zraka, posebej v mestih z gostim prometom, zelo neprijetno. Mešanica več sestavin, kakršne so nezgoreli ogljikovodiki, dušikovi oksidi, žveplove oksidi itd., ustvarja fotokemični smog, ki nastaja pri fotokemični reakciji nezgorelih ogljikovodikov in dušikovih oksidov v navzočnosti drugih udeležencev zaradi intenzivnega sončnega sevanja in pri inverziji temperature. Smog ovira pregled, draži sluznico oči in grla in povzroča obolenje dihalnih organov.

$\text{CO}$  se veže s hemoglobinom in zmanjšuje količino kisika v krvi.  $\text{C}_x\text{H}_y$  niso naravnost strupeni, pač pa lahko trajno delujejo na nastanek rakastih obolenj.

Zakonski predpisi za varstvo okolja omejujejo količino glavnih onesnaževalcev okolja v izpušnih plinih, in sicer  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}$  in  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO}_x$  v evropskem testu ni zajet).

Da bi reducirali omenjene onesnaževalce pod dopustno mejo, so bile opravljene obsežne raziskave vseh veličin, ki vplivajo na nastanek in zmanjšanje emisije izpušnih plinov. Na podlagi teh raziskav so nastale mnoge konstrukcijske rešitve, ki žal niso popolnoma izpolnile pričakovanj. Zato potekajo še naprej intenzivne študije in preizkusi, ker zakonodajalci še naprej zmanjšujejo dopustne meje.

Namen tega prispevka je prav tako raziskovati vpliv nekaterih veličin, kakor sta temperatura de-

lovnega zraka in obremenitev, na porabo goriva in emisijo ogljikovega monoksida ( $\text{CO}$ ), ogljikovodikov ( $\text{CH}$ ) in ogljikovega dioksida ( $\text{CO}_2$ ), kakor tudi temperaturo izpušnih plinov pri nestacionarnem obratovanju motorja.

### 2. VPLIV NESTACIONARNOSTI OBRATOVANJA MOTORJA NA EMISIJO IZPUŠNIH PLINOV

Motor lahko obratuje v štirih možnih stanjih: v prostem teku, pri pospeševanju pri konstantni hitrosti in pri pojemanju. Pri tem sta prosti tek in konstantna hitrost stacionarno obratovanje motorja. Za stacionarno obratovanje je značilno konstantno razmerje obremenitve in vrtilne hitrosti med daljšim časovnim obdobjem. Pri evropskem testu znaša delež stacionarnega stanja (prostega teka in konstantne hitrosti) vključno s časom za prestavljanje prestav 64,11 %, od česar pripada prostemu teku 34,87 %. Delež nestacionarnega stanja obratovanja znaša 35,9 %, od česar pripada pospeševanju 17,4 %, 18,5 % pa fazi pojemanja vključno s časom izklopljene prestave. Nestacionarno obratovanje je sestavljeno iz mnogih kvazistacionarnih stanj. Nestacionarna obratovanja (npr. mestni promet) so tista, pri katerih se hkrati spreminjata obremenitev motorja in vrtilna hitrost, ali vsaj eden od teh dveh faktorjev, in sicer s spreminjanjem kota dušilne lopate. Nestacionarnost obratovanja je zvezana s pogostim spreminjanjem lege dušilne lopute, kar ima za posledico obogatitev zmesi goriva in zraka v sesalni cevi zaradi pogostega sprožanja pospeševalne črpalke ali pa v nekaterih primerih tudi osiromašitev zmesi, ko ne pride do aktiviranja pospeševalne črpalke. V obeh primerih se lahko pojavi zmes s skrajno mejo vžiga v bogatem oz. revnem področju razmernika zraka in goriva, kar povzroči izostajanje vžiga v posameznih ciklih. Posledica takšnega obratovanja je močan porast emisije nezgorelih ogljikovodikov ( $\text{CH}$ ) in v bogatem območju razmernika zraka in goriva tudi ogljikovega monoksida ( $\text{CO}$ ) v izpušnih plinih.

V prostem teku obratuje motor z zmesjo, bogato z gorivom ( $0,65 < \lambda < 0,85$ ), ker je pri normalnem razmerniku zraka zmes težko vnetljiva zaradi velike količine zaostalih plinov v zgorevalnem prostoru, kar je posledica velikih podtlakov v sesal-

\* Delo je bilo opravljeno v okviru magistrske naloge na IVK (Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrwesen der Technischen Universität Wien).

nem vodu. Takšna zmes povzroča velike koncentracije CO in CH v izpušnih plinih. K sreči je vrtilna hitrost v prostem teku majhna, tako da je masna emisija kljub veliki koncentraciji razmeroma majhna. Pri pospeševanju, tj. pri hitrem odpiranju dušilne lopute, naglo upada podtlak v sesalni cevi, kar povzroča, da se kapljice goriva teže uparijo in se zaradi naglega padca hitrosti v sesalnem vodu kapljice goriva usedajo na stene sesalne cevi in tako se pojavi film goriva. Zaradi tega pride do osiromašitve zmesi v valju in izostanka vžiga ravne zmesi. V ta namen priskrbi pospeševalna črpalka dodatno količino goriva, ki je ponavadi predimenzionirana za zanesljivo obratovanje in za premagovanje vseh dodatnih odporov pri pospeševanju, kar naredi zmes prebogato z gorivom. Posledica tega je veliko povečanje emisije CH in CO. Ker je v fazi pospeševanja kot dušilne lopute zadosti velik, do 60...70°, sta pretok zraka in temu ustrezno goriva precejšnja, kar da v fazi pospeševanja velike masne emisije CH in CO.

V fazi pojemanja, tj. po zapiranju dušilne lopute, se film goriva na stenah cevovoda upari zaradi nastalega največjega podtlaka v sesalni cevi. Nastane zelo bogata zmes, ki slabo zgoreva zaradi pomanjkanja zraka, ki prihaja samo skozi sistem prostega teka, in zaradi velike količine zaostalih produktov zgorevanja, ki so posledica velikih podtlakov v sesalni cevi. To ima za posledico ekstremno velike koncentracije CH in delno CO. Masna emisija CO in CH v fazi pojemanja je majhna, ker uplinjač obratuje samo s sistemom prostega teka.

V fazi konstantne hitrosti je kot dušilne lopute konstanten in s tem tudi razmerje zraka. Zato je emisija izpušnih plinov še funkcija samo stopnje polnitve valja ( $\lambda_L$ ). Če motor dela z majhnimi stopnjami polnitve  $\lambda_L$ , tj. z velikim deležem zmesi, dobljene iz sistema za prosti tek uplinjača, je emisija CH največja zaradi izostajanja vžiga v posameznih ciklih. To je posledica prevelikega razredčenja zmesi z zaostalimi zgorevalnimi produkti in povratnimi

izpušnimi plini zaradi prevelikega podtlaka v sesalni cevi. Pri velikih stopnjah polnitve  $\lambda_L$  obratuje poleg sistema za prosti tek še glavna šoba in sistem za obogatitve za doseg največjih moči. V tem primeru imamo bogato zmes, ki povečuje emisijo CO in CH v izpušnih plinih, poleg tega pa so tudi masne emisije največje. V območju srednjih stopenj polnitve oz. srednjih hitrosti, približno pri 60 km/h, je v obratovanju sistem prostega teka in sistem glavne šobe. Sistem glavne šobe je dimenzioniran za tvorbo ravne zmesi, manjše emisije CO in CH pa imamo prav pri srednjih hitrostih vožnje.

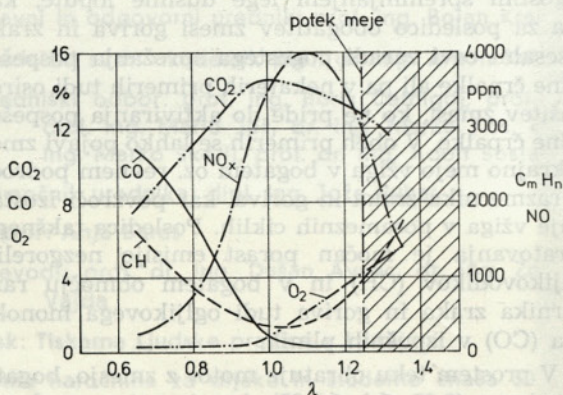
Kakor vidimo, obratujejo motorji v fazi prostega teka, pojemanja in pospeševanja, delno tudi v fazi konstantne hitrosti, z bogato zmesjo, kar pomeni obenem povečano emisijo CO in CH po sliki 1. Vendar so našete faze predvsem značilnost mestnega prometa, neprestanega ustavljanja in zaganjanja ter vožnje z majhnimi hitrostmi. Najmanjša emisija je pri hitrostih 60 do 70 km/h, tj. pri hitrostih, ki so mogoče samo zunaj naseljenih krajev, tj. zunaj življenjskega prostora velikega dela prebivalstva, zato nas v študijah običajno ne zanima. Velika emisija onesnaževalcev v mestih je povezana z večjo porabo goriva, kar je posledica pogostega sprožanja pospeševalne črpalke in bogate zmesi pri majhnih hitrostih vožnje.

### 3. VPLIV OBREMITVE MOTORJA NA EMISIJO IZPUŠNIH PLINOV

Obremenitev motorja raste s povečanjem odpora (vzpona vozne proge), s povečanjem hitrosti vožnje in z obremenitvijo vozila (npr. s tovorom). Povečana obremenitev terja večjo moč motorja oz. večjo stopnjo polnitve ( $\lambda_L$ ). Večjo stopnjo polnitve dosežemo z večjim kotom odprtja dušilne lopute. Pri majhnih in največjih močeh imamo zmes bogato z gorivom. Bogatejša zmes daje večjo emisijo CO in CH (po sliki 1) v izpušnih plinih. Pri manjših hitrostih se porabi velik del moči motorja za premagovanje trenja kotaljenja, odpora vzpona in za pospeševanje oz. za premagovanje masnih sil, zato je emisija CO sorazmerna s poprečno maso vozila. Raziskave so pokazale, da se pojavlja najmanjša emisija CO pri 3/4 obremenitve. Pri večjih in pri manjših obremenitvah emisija CO močno narašča. Podobno je z emisijo CH.

### 4. VPLIV TEMPERATURE DELOVNEGA ZRAKA NA EMISIJO IZPUŠNIH PLINOV

Maksimalne dinamične in gospodarske karakteristike motorja dosežemo pri računskih pogojih ( $t = 20^\circ\text{C}$ ,  $p = 760\text{ mm Hg}$  in vlažnosti 50%). Če odstopamo od teh pogojev, dobimo slabše karakteristike motorja, in sicer pri višjih temperaturah zraka zaradi poslabšane stopnje polnitve, pri nižjih temperaturah zraka pa zaradi slabše priprave zmesi in s tem slabših zgorevalnih razmer. Zmanjšanje



Sl. 1. Potek odvisnosti koncentracij CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CH in NO<sub>x</sub> od razmernika zraka  $\lambda$  za neko stanje obratovanja in tip motorja

moči zaradi slabše polnitve pri višji temperaturi izhaja iz enačbe

$$P = P_0 \frac{p_a}{p_0} \sqrt{\frac{T_{a0}}{T_a}} \quad (1)$$

Pri tem sta  $p_a$  in  $T_a$  tlak oz. temperatura delovnega zraka,  $p_0 = 101.325 \text{ Pa}$  (760 mm Hg),  $T_{a0} = 293 \text{ K}$  (20 °C). Vendar višja temperatura zraka ugodno vpliva na kakovost sestave zmesi, ker pripomore, da se del kapljic goriva na poti do valja upari in naredi zmes homogenejšo. Zato mora delovni zrak dovajati najmanj toploto, ki je potrebna za popolno uparjanje vseh kapljic goriva najpozneje do trenutka vžiga zmesi v valju motorja. Rezultat tega so boljše zgorevanje in manjše emisije CO in CH v izpušnih plinih. Poleg tega je razmerik zraka  $\lambda$  manj različen pri posameznih valjih zaradi boljše porazdelitve zmesi. Emisija CH se zmanjšuje z naraščanjem temperature delovnega zraka do približno 45 °C, potem pa začne zopet močno naraščati, kar je posledica prebogate zmesi, ki nastane po močnem razredčenju zraka (zmanjšanju gostote  $\rho$  zraka). Emisija CO je zrcalna slika poteka emisije CH. Višja temperatura delovnega zraka ugodno vpliva tudi na zmanjšanje oz. na odpravljanje filma goriva s sten sesalne cevi, ki je vir velikih koncentracij CH v fazi pojemanja, kar pomeni izgubo goriva.

Raziskave drugih avtorjev so pokazale, da je ogrevanje zmesi goriva in zraka komaj boljše od ogrevanja zraka samega razen tega je ogrevanje zmesi tehnično težje izvedljivo in bolj drago.

## 5. POTEK PREIZKUSA

Preizkusi so bili opravljeni na osebem avtomobilu FIAT 126 z motorjem Steyer-Puch (zračno hlajen 2-valjni štiritačni bokserski motor z delovno prostornino 643 cm<sup>3</sup> in kompresijskim razmerjem 1 : 7,8). Motor je bil opremljen z uplinjačem s padajočim tokom znamke Weber 32 1CS. Kot pogonsko gorivo je bilo uporabljeno specialno gorivo za izva-

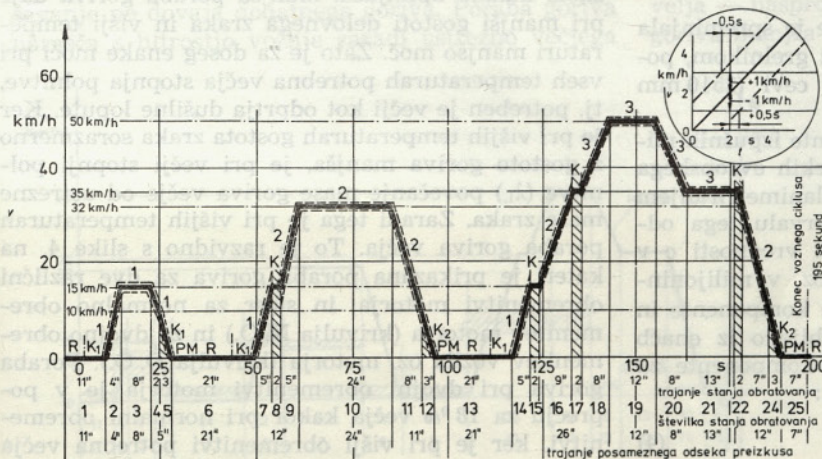
janje evropskega testa. Preizkus je bil opravljen na štirikoltnem preizkuševališču avtomobilov za izvajanje evropskega testa IVK.

Analiza CO in CO<sub>2</sub> je bila narejena z nedisperzivnim infrardečim absorpcijskim analizatorjem (NDIR). Analiza CH je bila opravljena s plamenionizacijskim detektorjem (FID). Analizatorji CO, CO<sub>2</sub> in CH so bili vgrajeni v skupno omaro (AVL), kjer je še štirikomponentni kompenzacijski pisalnik.

Omaro AVL omogoča sinhrono prikazovanje analognih vrednosti na instrumentih in zapisovanje prikazovanih vrednosti na pisalniku tako, da ni faznega pomika med zapisovanimi vrednostmi koncentracije merjenih komponent. Na pisalnik sta priključena še dva termoelementa, ki merita temperaturo delovnega zraka pred filtrom in temperaturo izpušnih plinov na mestu odvzemne sonde izpušnih plinov (2065 mm od izpušnega ventila). Med zapisi koncentracij merjenih komponent v izpušnih plinih ter temperaturami delovnega zraka in izpušnih plinov je fazni premik, kakor je tudi med temperaturnima zapisoma zaradi različnih dolžin med mernimi mesti in analizatorsko napravo. Vendar je ta fazna razlika velikostnega reda nekaj sekund in nima bistvenega vpliva na merilne rezultate, ker zapisi temperatur rabijo za določanje povprečnih temperatur.

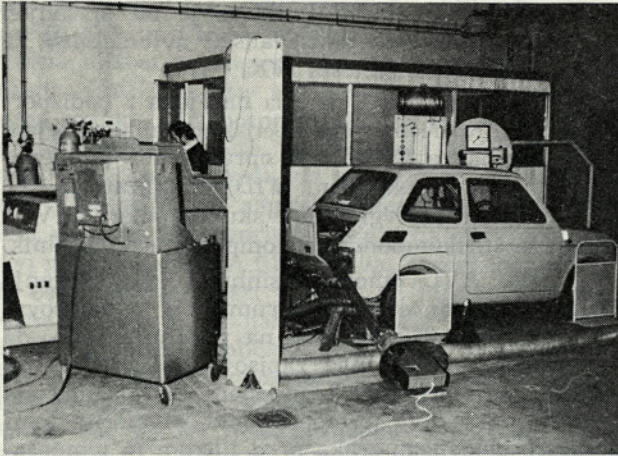
Kot podlaga za nestacionarno stanje obratovanja je rabil evropski vozni cikel, preizkus I po sliki 2.

Evropski vozni cikel (sl. 2) sestoji iz štirih odsekov prostega teka, treh odsekov pospeševanja, štirih odsekov konstantne hitrosti in štirih odsekov pojemanja ter sestavlja skupaj 15 odsekov. Odsek prostega teka pri prestavljanju hitrosti, pri pospeševanju in pri izklopljeni prestavi pri pojemanju je prišteta k odseku pospeševanja oz. pojemanja. Evropski vozni cikel je torej razdeljen na 15 odsekov, v katerih je določena delna koncentracija merjene komponente oz. masna emisija na podlagi s preizkusi dobljenih koeficientov, ki podajajo razmerje med prostornino izpušnih plinov in maso goriva. Prostornina izpušnih plinov je za posamezni odsek ev-



Sl. 2. Shema evropskega vozne-  
ga cikla za bencinske motorje  
pri preizkusu tipa I

- 1 — 1. prestava, 2 — 2. prestava, 3 — 3. prestava
- K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub> — izklopljen pogon v 1.—2. prestavi
- K — izklopljen pogon
- PM — prosti tek (pogon)
- R — prosti tek (motor)
- Srafirano — postopek prestavljanja
- tolerance za hitrosti (± 1 km/h) in čas (± 0,5 s) se v vsaki točki geometrično seštejejo



Slika 3

ropskega testa določena na podlagi meritev porabe goriva za posamezne odseke evropskega testa in na podlagi dobljenega razmerja med prostornino izpušnih plinov  $V$  in porabo goriva  $m_g$ . To razmerje znaša za preizkuse z dvojno obremenitvijo in temperaturo delovnega zraka nad  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\frac{V}{m_g} = 9,5 \text{ m}_n^3/\text{kg} \quad (2)$$

in pri preizkusih z normalno obremenitvijo in temperaturo delovnega zraka pod  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  velja razmerje

$$\frac{V}{m_g} = 10 \text{ m}_n^3/\text{kg} \quad (3)$$

Serijski preizkusi so bili opravljani pri normalni obremenitvi motorja oz. vozila, tj. po predpisih za izvajanje evropskega testa (teža praznega vozila plus teža voznika minus polovična teža tanka za gorivo).

Druga serija je bila opravljena pri dvojni dopustni obremenitvi vozila, ki je simulirano z dodajanjem dodatnih nihajnih mas v okviru preizkuševališča.

Temperatura delovnega zraka se je spreminjala od  $20$  do  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , zrak smo ogrevali z grelnikom, postavljenim pred podaljšek sesalne cevi ( $2510\text{ mm}$  pred sesalnim ventilom, slika 3).

Koncentracija merjene komponente izpušnih plinov (CO in CH) v posameznih odsekih evropskega voznega cikla je bila določena s planimetričnim zapisom površine v časovnem intervalu tega odseka. Z množenjem tako dobljenih vrednosti  $c$  v prostorninskih odstotkih ( $\%$ ) CO oz. v milijoninah (ppm) CH z gostoto  $\rho$  ustrezne komponente in prostornino  $V$  izpušnih plinov, dobljeno iz enačb (2) oz. (3), dobimo masno emisijo komponente za posamezne odseke evropskega testa:

$$M_{ij} = c_{ij} \cdot V_j \cdot \rho_{ij} \quad (4)$$

Pri tem se indeks  $i$  nanaša na  $i$ -to komponento v izpušnih plinih in indeks  $j$  na  $j$ -ti odsek evropskega voznega cikla.

Tako vrednotenje rezultatov daje tako imenovani »sintetični test«, katerega vsote poprečnih koncentracij posameznih odsekov se ujemajo z rezultatom, ki ga dobimo po enačbi

$$M_i = c_i \cdot V \cdot \rho_i \quad (5)$$

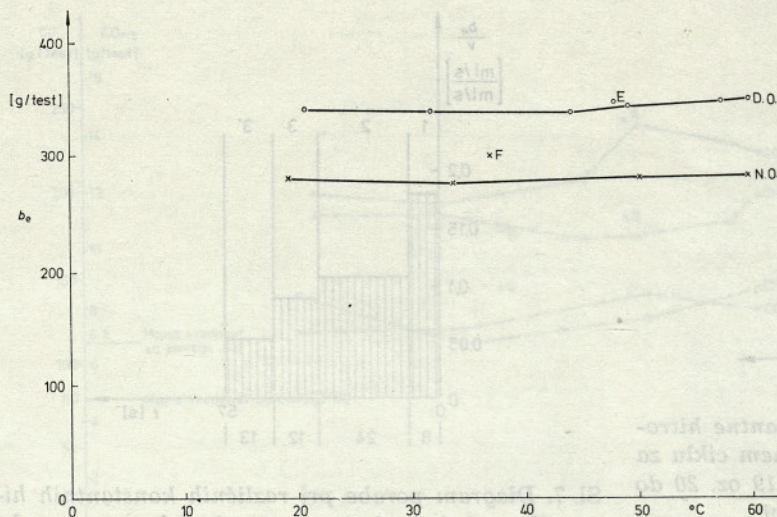
tj. za celotni evropski test.

Poleg obdelave podatkov po posameznih odsekih nestacionarnega obratovanja so vrednoteni rezultati po predpisih za izvajanje evropskega testa.

## 6. PRIKAZ REZULTATOV IN RAZPRAVA

### 6.1. Vpliv temperature delovnega zraka in obremenitve vozila na porabo goriva na evropski test

Iz diagrama na sliki 4 vidimo, da se poraba goriva do temperature  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  pri dvojni obremenitvi oz. do temperature  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  pri normalni obremenitvi rahlo manjša in da se nad omenjenimi temperaturami delovnega zraka začne večati. Tako se povečuje poraba goriva pri temperaturi delovnega zraka  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  za okoli  $2,5\%$ , kar si lahko razlagamo kot posledico zvišanja temperature goriva. Gorivo namreč sprejema deloma temperaturo uplinjača, ogrevanega z ogretim delovnim zrakom, ki se pretaka skozi uplinjač, in sevalno toploto motorja. Ko je temperatura delovnega zraka višja, se dvigne temperatura uplinjača in motorja, ki odda uplinjaču več sevalne toplote. Višja temperatura goriva ima za posledico zmanjšanje viskoznosti goriva, kar zboljša pretočne razmere v kanalih za gorivo v uplinjaču. S povišanjem temperature delovnega zraka je temperatura goriva ustrezno višja, tako da se lažje frakcije goriva uparijo, zaradi česar se gorivo pretaka skozi kanale uplinjača v dveh stanjih — plinskem in tekočinskem. Prostornina pare goriva je približno  $150$ -krat večja od prostornine tekočin, kar ima za posledico manjši pretok goriva skozi kanale uplinjača. Manjša poraba goriva daje pri manjši gostoti delovnega zraka in višji temperaturi manjšo moč. Zato je za doseg enake moči pri vseh temperaturah potrebna večja stopnja polnitve, tj. potreben je večji kot odprtja dušilne lopute. Ker je pri višjih temperaturah gostota zraka sorazmerno z gostoto goriva manjša, je pri večji stopnji polnitve ( $\lambda_L$ ) povečanje mase goriva večje od ustrezne mase zraka. Zaradi tega je pri višjih temperaturah poraba goriva večja. To je razvidno s slike 4, na kateri je prikazana poraba goriva za dve različni obremenitvi motorja, in sicer za normalno obremenitev motorja (krivulja N. O.) in za dvojno obremenitev vozila oz. motorja (krivulja D. O.). Poraba goriva pri dvojni obremenitvi motorja je v povprečju za  $18\%$  večja kakor pri normalni obremenitvi, ker je pri višji obremenitvi potrebna večja



Sl. 4. Diagram porabe goriva po evropskem testu v odvisnosti od temperature delovnega zraka in obremenitve

Temperatura delovnega zraka  $t_z$   
 Brez podaljška sesalne cevi:  
 ○ E — poraba goriva pri dvojni obremenitvi  
 × F — poraba goriva pri normalni obremenitvi  
 S podaljškom sesalne cevi pred filtrom:  
 ○—○ D. O. — dvojni obremenitev  
 ×—× N. O. — normalna obremenitev

moč motorja, ki terja ustrezno večjo stopnjo polnitve valja. Pri večji stopnji polnitve je hitrost zraka v grlu difuzorja večja, kar povzroča večji pretok goriva skozi šobo za gorivo v uplinjaču in s tem večjo porabo goriva.

## 7. PORABA GORIVA PRI NESTACIONARNEM OBRATOVANJU

Na sliki 5 je prikazana poraba goriva na časovno enoto za posamezne faze obratovanja po evropskem voznem ciklu in pri dvojni obremenitvi vozila.

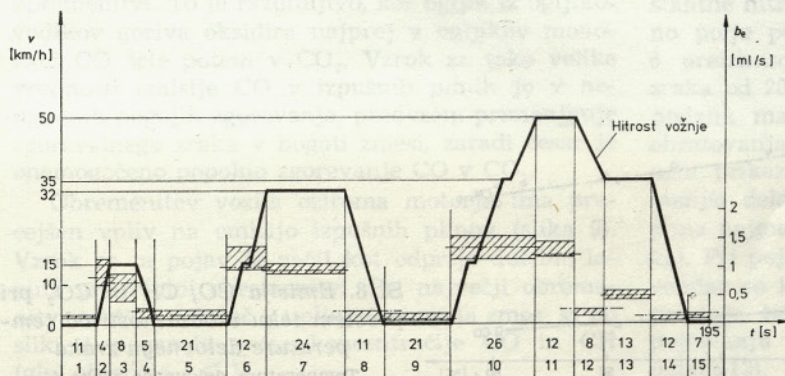
Pri prostem teku in pojemanju se porablja najmanjša količina goriva, tj. za obratovanje sistema prostega teka (odseki 1, 5, 9, 15 za prosti tek in 4, 8, 12, 14 za pojemanje). Pri pospeševanju je poraba največja, ker pri tem obratovanju delujejo poleg sistema prostega teka še sistem glavne šobe in sistem za pospeševanje, v katerem črpalka za pospeševanje dovaja dodatno količino goriva. S slike 5 je nadalje razvidno, da je poraba goriva večja pri pospeševanju na večjo končno hitrost (odseki 2, 6, 10). Poraba goriva pri stalni hitrosti je nekoliko manjša kakor pri pospeševanju, ker je pri tem lega dušilne lopute nespremenjena in črpalka za pospeševanje ne dovaja dodatnega goriva. Poraba goriva narašča s hitrostjo vožnje zaradi ustrezno večjega

kota odprtja dušilne lopute (odseki 3, 7, 11). V odseku 13 je manjša poraba goriva kakor v odseku 7 oz. 3 kljub večji hitrosti vožnje v odseku 13. Vzrok za to sta pred tem večja hitrost vožnje v odseku 11 (slika 5) in vztrajnost vozila, tako da je za vzdrževanje ustrezne hitrosti potrebna manjša količina goriva. Poševno črtkano polje pomeni osipanje vrednosti šestih preizkusov ustrezno diagramu na sliki 4.

Od celotne porabe pripada 87 do 95 % pospeševanju in konstantni hitrosti.

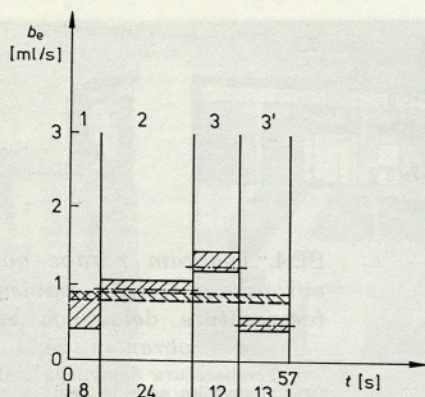
Pri normalni obremenitvi so razmere podobne, samo da so absolutne vrednosti manjše, ustrezno razlagi k sliki 4.

Na sliki 6 je prikazana poraba goriva v enoti časa pri konstantnih hitrostih in različnih prestavah prenosnega mehanizma, slika 7 pa kaže porabo goriva na enoto poti, ki jo vozilo prevozi pri ustrezni hitrosti vožnje. S slike 6 vidimo, da se poraba goriva v časovni enoti pri višji prestavi večja zaradi večje obremenitve oz. vrtilne hitrosti motorja in s tem večjega kota odprtja dušilne lopute, razen pri tretji prestavi, ki izkorišča učinek vztrajnostnih mas vozila pri prehodu z višje hitrosti na nižjo. Za sliko 7 velja — nasprotno kakor za sliko 6 — da se poraba goriva manjša z večanjem hitrosti vožnje glede na



Sl. 5. Diagram porabe v posameznih fazah obratovanja evropskega voznega cikla za temperaturo delovnega zraka od 20 do 60°C in dvojni obremenitev

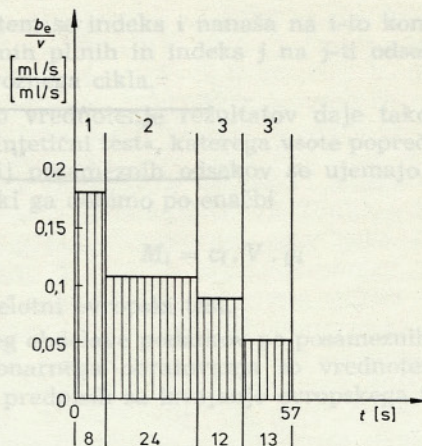
Srafirano — polje sipanja vrednosti  $b_e$  pri temperaturi delovnega zraka od 20 do 60°C  
 - - - - - poraba goriva pri temperaturi delovnega zraka 60°C



Sl. 6. Diagram porabe za različne konstantne hitrosti, ki se pojavljajo pri evropskem voznem ciklu za različne temperature delovnega zraka (19 oz. 20 do 60 °C) pri dvojni obremenitvi

- 1 — 1. prestava pri 15 km/h
- 2 — 2. prestava pri 32 km/h
- 3 — 3. prestava pri 50 km/h
- 3' — 3. prestava pri 35 km/h

Sraf. (///) — polje sipanja vrednosti pri temperaturah delovnega zraka od 20 do 60 °C oziroma od 19 do 60 °C  
 Sraf. (\\) — poprečna vrednost  
 - - - - - poraba goriva pri temperaturi delovnega zraka 60 °C



Sl. 7. Diagram porabe pri različnih konstantnih hitrostih vožnje pri temperaturi delovnega zraka 60 °C za dvojni obremenitev

- 1 — 1. prestava pri 15 km/h
- 2 — 2. prestava pri 32 km/h
- 3 — 3. prestava pri 50 km/h
- 3' — 3. prestava pri 35 km/h

prevoženo pot. Zato naj bi bila hitrost vožnje čim večja, česar pa prometne razmere v mestih ne dopuščajo.

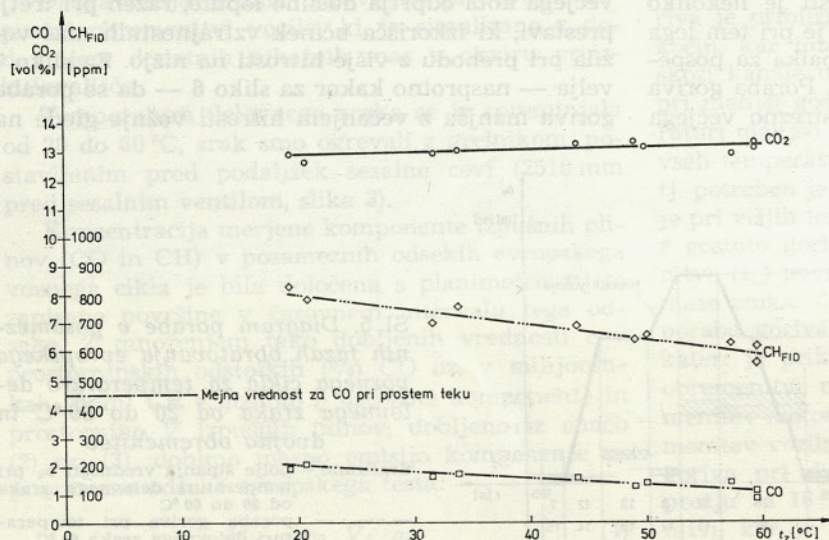
## 8. VPLIV TEMPERATURE DELOVNEGA ZRAKA NA EMISIJO IZPUŠNIH PLINOV PRI PROSTEM TEKU

Na sliki 8 so podane vrednosti emisije CO, CH<sub>FID</sub> in CO<sub>2</sub>, izmerjene pri prostem teku motorja v odvisnosti od temperature delovnega zraka. Emisiji CO in CH se manjšata s temperaturo delovnega zraka zaradi boljšega uparjanja goriva in popolnejšega zgorevanja v končne produkte zgorevanja. Za-

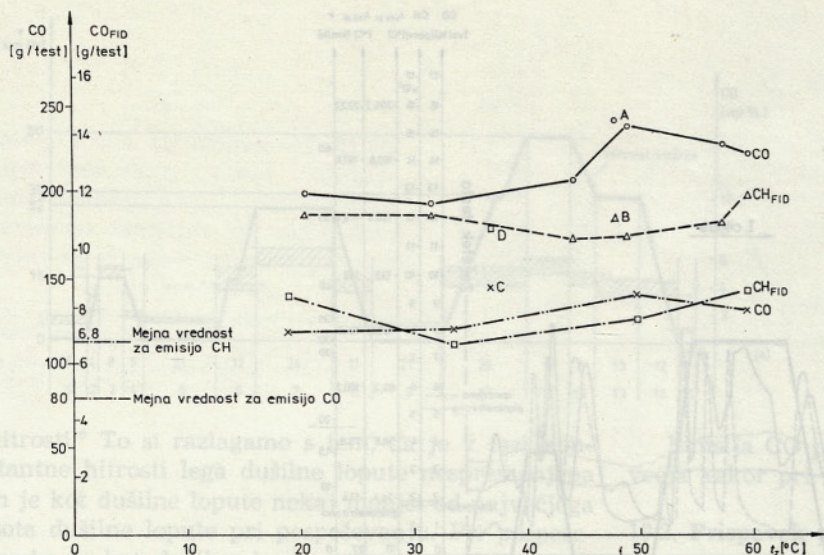
to emisija CO<sub>2</sub> narašča s povišanjem temperature delovnega zraka na račun manjše emisije ogljikovega monoksida (CO) in ogljikovodikov (CH).

## 9. VPLIV TEMPERATURE DELOVNEGA ZRAKA IN OBREMENITVE NA EMISIJO IZPUŠNIH PLINOV PO PREDPISIH ZA IZVAJANJE EVROPSKEGA TESTA

Odvisnost masnih emisij CO in CH od temperature delovnega zraka in obremenitve vozila oz. motorja je prikazana na sliki 9. Masna emisija CH v odvisnosti od temperature delovnega zraka se manjša do okoli 45 °C pri dvojni obremenitvi oz. do



Sl. 8. Emisija CO, CH in CO<sub>2</sub> pri prostem teku v odvisnosti od temperature delovnega zraka



Sl. 9. Masna emisija izpušnih plinov v odvisnosti od temperature delovnega zraka in obremenitve

Temperatura delovnega zraka  $t_2$

Brez podaljške sesalne cevi:

○ A — masna emisija CO pri dvojni obremenitvi

△ B — masna emisija CH pri dvojni obremenitvi

× C — masna emisija CO pri normalni obremenitvi

□ D — masna emisija CH pri normalni obremenitvi

S podaljškom sesalne cevi pred začetnim filtrom:

○—○ CO — dvojni obremenitev

△—△ CH<sub>FID</sub> — dvojni obremenitev

×—× CO — normalna obremenitev

□—□ CH<sub>FID</sub> — normalna obremenitev

okoli 35 °C pri normalni obremenitvi, nato začena naraščati. Emisija CH pojema do omenjenih temperatur delovnega zraka zaradi boljšega uparjanja kapljic goriva in zato boljšega zgorevanja ter zaradi naraščanja temperature izpušnih plinov (slika 18), ki omogoča sekundarno dogorevanje nezgorelih ogljikovodikov v izpušnem sistemu. Pri višjih temperaturah se bolj uparjene kapljice goriva bolj homogeno porazdelijo po prerezu cevi in na posamezne valje, kar omogoča popolnejše zgorevanje goriva v valju motorja in zaradi tega manjšo koncentracijo nezgorelih ogljikovodikov v izpušnih plinih.

Porast emisije CH nad temperaturo 45 °C pri dvojni obremenitvi oz. nad 35 °C pri normalni obremenitvi si razlagamo kot posledico obogatitja zmesi pri višjih temperaturah delovnega zraka in nižje temperature izpušnih plinov (sl. 18), kar je spet posledica nižjih temperatur motorja pri višjih temperaturah delovnega zraka. Emisija ogljikovega monoksida CO v odvisnosti od temperature delovnega zraka je zrcalna slika emisije nezgorelih ogljikovodikov v izpušnih plinih (slika 9). Emisija CO narašča do temperature delovnega zraka okoli 45 °C pri dvojni obremenitvi oz. okoli 35 °C pri normalni obremenitvi. To je razumljivo, ker ogljik iz ogljikovodikov goriva oksidira najprej v ogljikov monoksid CO šele potem v CO<sub>2</sub>. Vzrok za take velike vrednosti emisije CO v izpušnih plinih je v neugodnih pogojih zgorevanja, predvsem primanjkuje zgorevalnega zraka v bogati zmesi, zaradi česar je onemogočeno popolno zgorevanje CO v CO<sub>2</sub>.

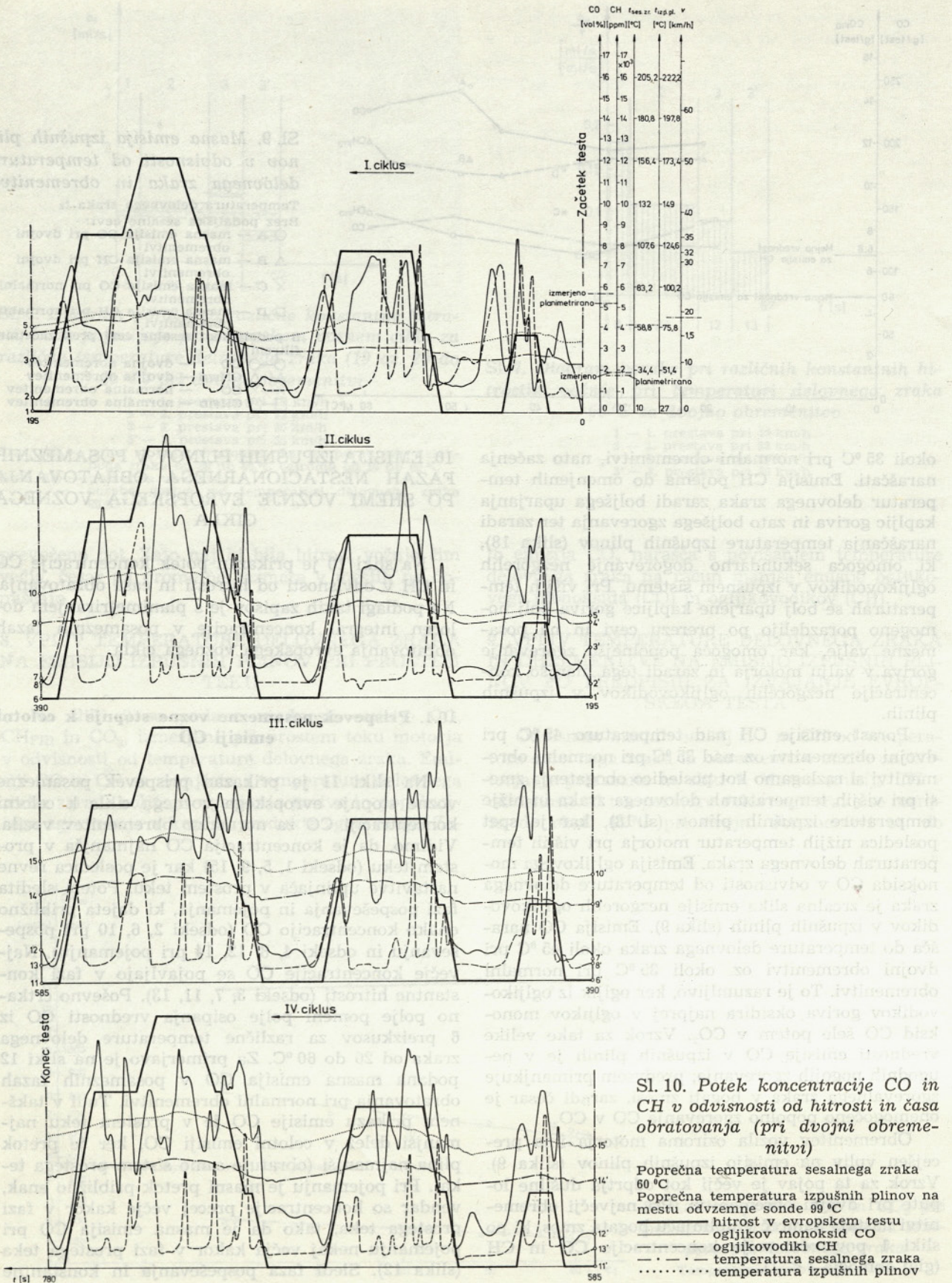
Obremenitev vozila oziroma motorja ima precejšen vpliv na emisijo izpušnih plinov (slika 9). Vzrok za ta pojav je večji kot odprtja dušilne lopute pri dvojni obremenitvi. Pri največji obremenitvi nastaja namreč v uplinjaču bogata zmes, ki po sliki 1 povzroča večje koncentracije CO in CH (glej območje  $\lambda < 1$ ).

## 10. EMISIJA IZPUŠNIH PLINOV V POSAMEZNIH FAZAH NESTACIONARNEGA OBRATOVANJA PO SHEMI VOŽNJE EVROPSKEGA VOZNEGA CIKLA

Na sliki 10 je prikazan potek koncentracije CO in CH v odvisnosti od hitrosti in časa obratovanja. Na podlagi takih zapisov je s planimetriranjem določen integral koncentracije v posameznih fazah obratovanja evropskega voznega cikla.

### 10.1. Prispevek posamezne vozne stopnje k celotni emisiji CO

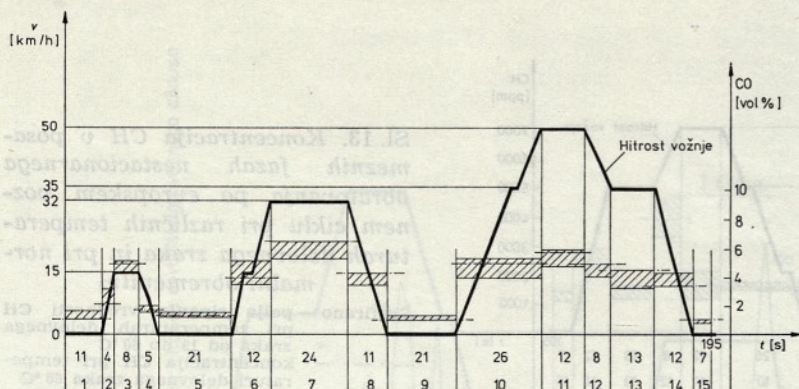
Na sliki 11 je prikazan prispevek posamezne vozne stopnje evropskega voznega cikla k celotni koncentraciji CO za normalno obremenitev vozila. Vidimo, da je koncentracija CO najmanjša v prostem teku (odseki 1, 5, 9, 15) kar je posledica revne nastavitve uplinjača v prostem teku. Potem sledita fazi pospeševanja in pojemanja, ki dajeta približno enako koncentracijo CO (odseki 2, 6, 10 pri pospeševanju in odseki 4, 8, 12, 14 pri pojemanju). Največje koncentracije CO se pojavljajo v fazi konstantne hitrosti (odseki 3, 7, 11, 13). Poševno črtkano polje pomeni polje osipanja vrednosti CO iz 6 preizkusov za različne temperature delovnega zraka od 20 do 60 °C. Za primerjavo je na sliki 12 podana masna emisija CO v posameznih fazah obratovanja pri normalni obremenitvi. Tudi v takšnem prikazu emisije CO je v prostem teku najmanjši delež v celotni emisiji CO, ker je pretok plina najmanjši (obratuje samo sistem prostega teka). Pri pojemanju je masni pretok približno enak, vendar so koncentracije precej večje kakor v fazi prostega teka, tako da je masna emisija CO pri pojemanju nekaj večja kakor v fazi prostega teka (slika 12). Sledi faza pospeševanja in konstantne



Sl. 10. Potek koncentracije CO in CH v odvisnosti od hitrosti in časa obratovanja (pri dvojni obremenitvi)

Poprečna temperatura sesalnega zraka 60 °C  
 Poprečna temperatura izpušnih plinov na mestu odvzemne sonde 99 °C  
 — hitrost v evropskem testu  
 — ogljikov monoksid CO  
 - - - ogljikovodiki CH  
 ····· temperatura sesalnega zraka  
 ····· temperatura izpušnih plinov





Sl. 11. Koncentracija CO v posameznih fazah nestacionarnega obratovanja po evropskem voznem ciklu pri različnih temperaturah delovnega zraka in normalni obremenitvi

Srafirano — področje sipanja vrednosti CO pri temperaturah delovnega zraka od 19 do 60 °C  
 - - - - - koncentracija CO pri temperaturi delovnega zraka 60 °C

hitrosti.\* To si razlagamo s tem, da je v fazi konstantne hitrosti lega dušilne lopute nespremenjena in je kot dušilne lopute nekaj manjši od največjega kota dušilne lopute pri pospeševanju. Pri pospeševanju se kot dušilne lopute neprestano spreminja še posebej zaradi vmesnega prestavljanja prestav. V fazi konstantne hitrosti pride v valj tudi del filma goriva, ki naredi zmes bogatejšo, pri manjših hitrostih pa še posebno bogato zmes. Bogata zmes, kakor vemo, pa zaradi pomanjkanja zgorevalnega zraka povečuje emisije CO v izpušnih plinih. Pozornost zbujajo precejšnja razlika koncentracije CO na sliki 11 in masne emisije CO na sliki 12 v fazi pojemanja (odseki 4, 8, 12, 14). Velika koncentracija CO v fazi pojemanja je posledica izhlapevanja filma goriva s sten cevi po zapiranju dušilne lopute in povečanju podtlaka. Poleg tega ni dovolj zgorevalnega zraka, ker nastaja zmes samo v prostem teku. Ker pa je pretok približno enak tistemu v prostem teku, je masna emisija po enačbah (4) oz. (5) večja kakor v prostem teku. Delež masne emisije v posameznih fazah obratovanja je za celotni test v odstotkih naslednji: v fazi prostega teka okoli 11 %, v fazi pospeševanja okoli 26 %, v fazi konstantne hitrosti okoli 42 % in v fazi pojemanja okoli 21 %. Masna emisija CO narašča s porastom konstantne hitrosti. Vzrok za to je večji pretok zmesi goriva in zraka.

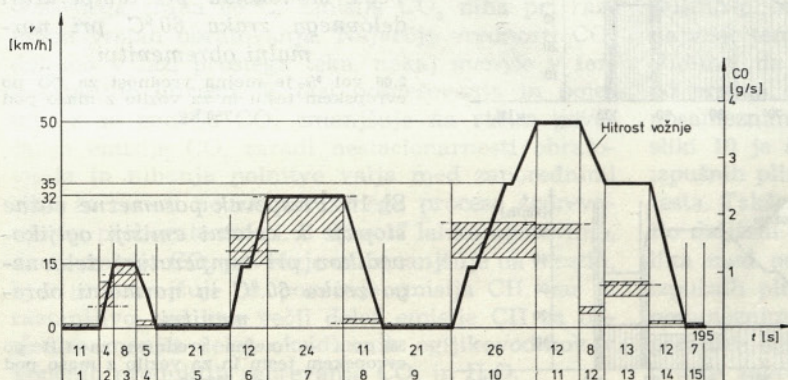
\* Tudi masna emisija CO je največja v fazi konstantne hitrosti.

Emisija CO pri dvojni obremenitvi je po sliki 9 večja kakor pri normalni obremenitvi.

## 10.2. Prispevek posamezne vozne stopnje k celotni emisiji CH

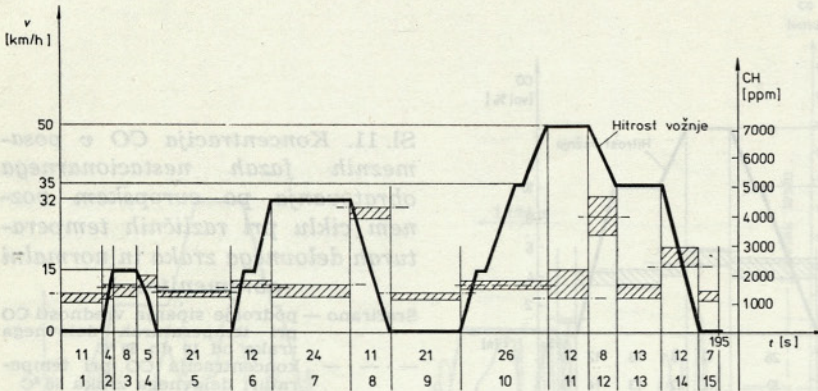
Na sliki 13 je prikazan prispevek posamezne vozne stopnje evropskega vozne cikla na celotno koncentracijo CH pri normalni obremenitvi. S te slike kakor tudi s slike 10 vidimo, da je koncentracija CH najmanjša pri prostem teku (odseki 1, 5, 9, 15). Emisija CH je pri pospeševanju (odseki 2, 5, 10) in konstantni hitrosti (odseki 3, 7, 11, 13) približno enaka. Največje koncentracije neizgorelih ogljikovodikov se pojavljajo v fazi pojemanja (odseki 4, 8, 12, 14), ker se v tej fazi pojavlja po zapiranju dušilne lopute največji podtlak v sesalni cevi za dušilno loputo, kar ustvarja pogoje za hitro izhlapevanje filma goriva na stenah sesalne cevi, nastalega v fazi pospeševanja in konstantne hitrosti. V fazi pojemanja prihaja zgorevalni zrak samo skozi sistem prostega teka, tj. prihaja že z zmesjo, bogato z gorivom. Ta količina zraka ne zadošča za popolno zgorevanje goriva, ki prihaja v valj iz sistema prostega teka in uparjenega filma goriva, zato velik del neizgorelih ogljikovodikov izhaja z izpušnimi plini v ozračje. Zaradi tega dobimo v fazi pojemanja približno dvakratne vrednosti od vrednosti v fazi pospeševanja ali konstantne hitrosti in trikratne vrednosti od vrednosti v fazi prostega teka.

Na sliki 14 so podane masne emisije CH za normalno obremenitev kot prispevek posamezne vozne



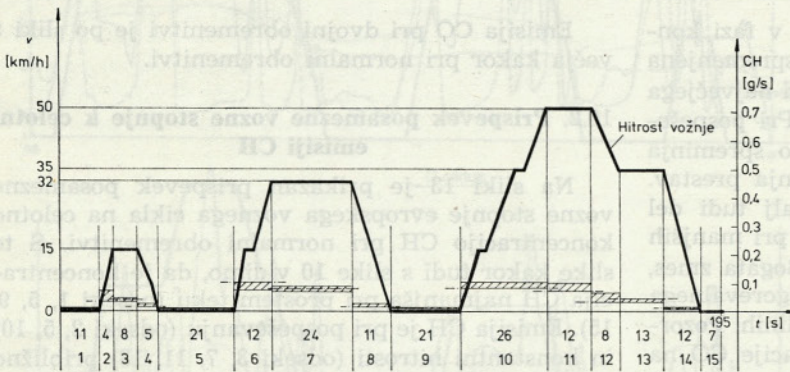
Sl. 12. Masna emisija CO v časovni enoti v posameznih fazah nestacionarnega obratovanja po evropskem voznem ciklu pri različnih temperaturah delovnega zraka in normalni obremenitvi

Srafirano — polje sipanja vrednosti CO pri temperaturah delovnega zraka od 19 do 60 °C  
 - - - - - masna emisija CO pri temperaturi delovnega zraka 60 °C



Sl. 13. Koncentracija CH v posameznih fazah nestacionarnega obratovanja po evropskem voznem ciklu pri različnih temperaturah delovnega zraka in pri normalni obremenitvi

Srafirano — polje sipanja vrednosti CH pri temperaturah delovnega zraka od 19 do 60 °C  
 - - - - - koncentracija CH pri temperaturi delovnega zraka 60 °C



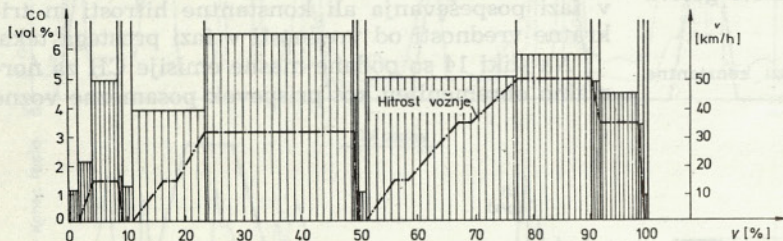
Sl. 14. Masna emisija CH v časovni enoti v posameznih fazah nestacionarnega obratovanja po evropskem voznem ciklu pri različnih temperaturah delovnega zraka in normalni obremenitvi

Srafirano — polje sipanja vrednosti CH pri temperaturah delovnega zraka od 19 do 60 °C  
 - - - - - masna emisija CH pri temperaturi delovnega zraka 60 °C

stopnje k masni emisiji CH v celotnem testu. Če primerjamo sliki 13 in 14, lahko opazimo precejšnje razlike predvsem v fazi pojemanja in pospeševanja. Pretok zmesi goriva in zraka v fazi pojemanja je tako majhen, da velika koncentracija CH, ki se pojavlja v tej fazi, nima takšnega učinka na onesnaževanje okolice kakor npr. v fazi pospeševanja, ko so koncentracije nezgorelih ogljikovodikov CH manjše, vendar so pretoki precejšnji, tako da je masna emisija dosti večja kakor v fazi pojemanja. Koncentracija CH v fazi pospeševanja je namreč malenkostno večja kakor v fazi prostega teka (slika 13), medtem ko se masna emisija CH v teh dveh fazah precej razlikuje (slika 14). Vzrok za to je ve-

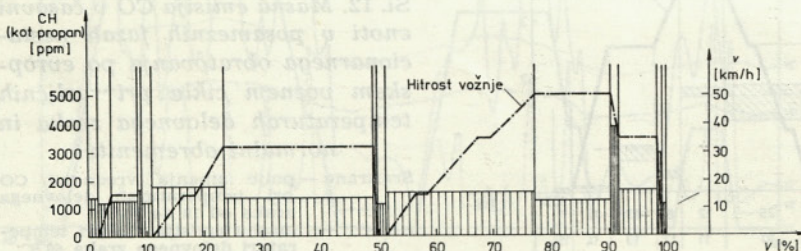
lika razlika v pretoku plina pri prostem teku in v fazi pospeševanja. Ustrezno temu prosti tek prispeva k celotni masni emisiji CH na test z okoli 4%, faza pospeševanja z okoli 42%, faza konstantne hitrosti z okoli 46% in faza pojemanja z okoli 8%. Masna emisija CH narašča z naraščanjem konstantne hitrosti pri vseh obremenitvah, razen pri 3. hitrosti, ko prehajamo z večje vozne hitrosti na manjšo.

Na sliki 15 je prikazan prispevek emisije CO in na sliki 16 prispevek emisije CH v posameznih vozniških stopnjah v odvisnosti od prostornine izpušnih plinov, pri normalni obremenitvi in temperaturi delovnega zraka 60 °C. Koncentraciji CO in CH po-



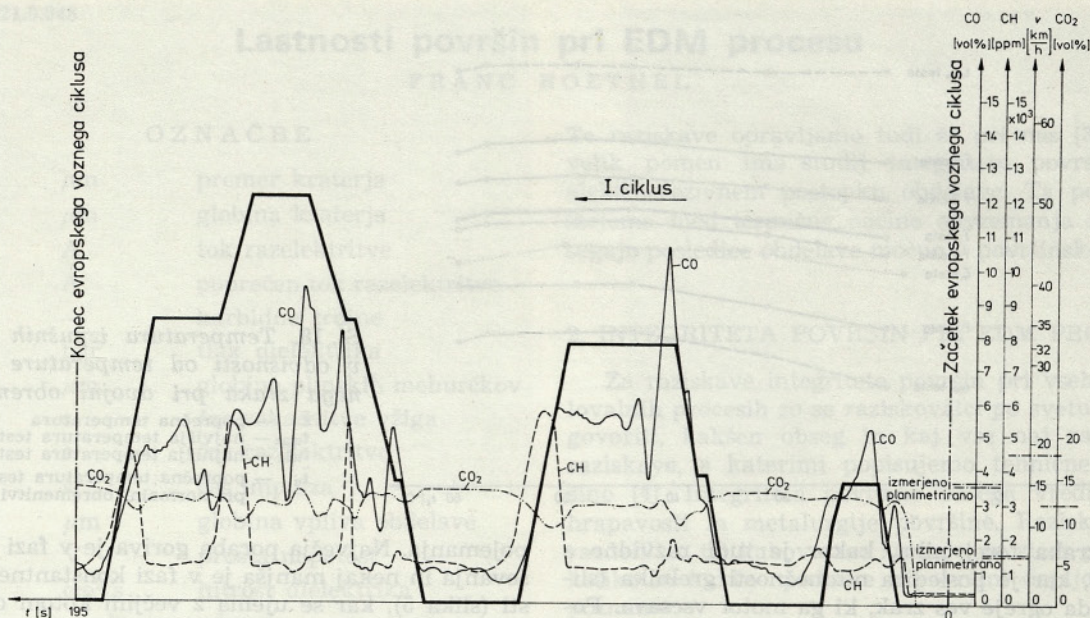
Sl. 15. Prispevek posamezne vozne stopnje k celotni emisiji ogljikovega monoksida pri temperaturi delovnega zraka 60 °C pri normalni obremenitvi

2,06 vol % je mejna vrednost za CO po evropskem testu in za vozilo z maso pod 750 kg



Sl. 16. Prispevek posamezne vozne stopnje k celotni emisiji ogljikovodikov pri temperaturi delovnega zraka 60 °C in normalni obremenitvi

568 ppm — mejna vrednost za CH po evropskem testu in za vozilo z maso pod 750 kg



Sl. 17. Evropski test obremenitev (N. O.)

Poprečna temperatura delovnega zraka 60 °C  
 Poprečna temperatura izpušnih plinov na mestu odvzemne sonde 81 °C  
 ————— hitrost po evropskem voznem ciklu ————— ogljikovodiki CH  
 ————— ogljikov monoksid CO ..... ogljikov dioksid CO<sub>2</sub>

tekata podobno prejšnjim ugotovitvam. Na slikah 15 in 16 opazimo, da skoraj celotna prostornina izpušnih plinov nastane v fazi pospeševanja in konstantne hitrosti — od 87 do 91 % — v fazi pojemanja in prostega teka pa samo 9 do 13 % celotne prostornine izpušnih plinov. Nadalje opazimo (slika 16) velike koncentracije CH in majhne prostornine izpušnih plinov v fazah pojemanja, kar daje po enačbi (4) 8-odstotni delež faze pojemanja v celotni masni emisiji CH med testom.

Emisija CH pri dvojni obremenitvi je večja kakor pri normalni obremenitvi, ustrezno sliki 9.

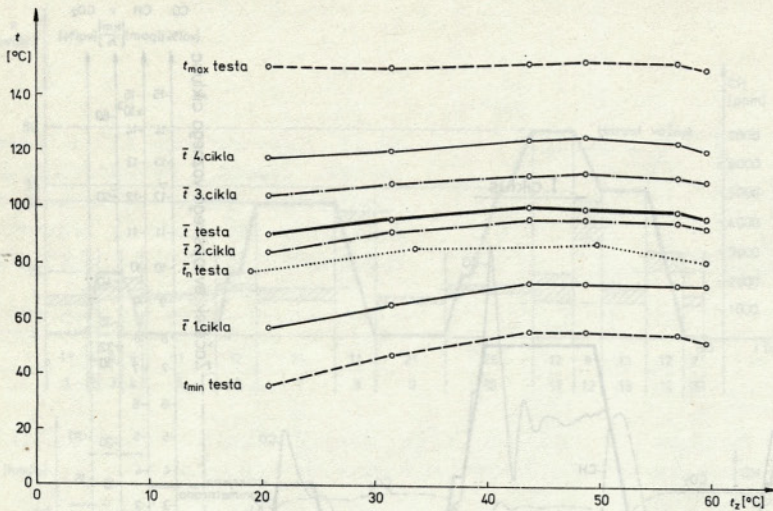
### 10.3. Emisija ogljikovega dioksida CO<sub>2</sub> pri nestacionarnem obratovanju motorja

Na sliki 17 je prikazan med drugim zapis koncentracije CO<sub>2</sub> pri vožnji po shemi evropskega voznega cikla pri normalni obremenitvi in temperaturi delovnega zraka 60 °C. Emisija CO<sub>2</sub> niha pri različnih vrstah obratovanja. Največje vrednosti CO<sub>2</sub> dobimo v fazi prostega teka, nekaj manjše v fazi konstantne hitrosti. V fazi pospeševanja in pojemanja se emisija CO<sub>2</sub> zmanjšuje na račun povečanja emisije CO, zaradi nestacionarnosti obratovanja in nihanja polnitve valja med zaporednimi cikli in zaradi neuravnovešenega procesa zgorevanja ter prebogate zmesi. S slike 17 lahko ugotovimo, da se emisija CO<sub>2</sub> povečuje oz. zmanjšuje na mestih, kjer se zmanjšuje oz. povečuje emisija CH, kar je razumljivo, saj ima večji delež emisije CH za posledico manjši delež oksidiranih ogljikovodikov v končnih produktih zgorevanja CO<sub>2</sub> in H<sub>2</sub>O.

### 11. TEMPERATURA IZPUŠNIH PLINOV V ODVISNOSTI OD TEMPERATURE DELOVNEGA ZRAKA IN OBREMITVE

Na sliki 18 je prikazan potek temperature izpušnih plinov v odvisnosti od temperature delovnega zraka pri dvojni obremenitvi vozila. Temperatura izpušnih plinov se zvišuje z višanjem temperature delovnega zraka do približno 45 °C, nad to temperaturo se temperatura izpušnih plinov niža. Vzrok za takšen potek temperature izpušnih plinov so temperature motorja, ki se višajo s povečanjem temperature delovnega zraka. Nad temperaturo delovnega zraka približno 45 °C se temperatura izpušnih plinov znižuje zaradi zmanjšanja gostote delovnega zraka in s tem znižanja najvišje in srednje temperature zgorevalnega procesa, kar povzroča znižanje temperature izpušnih plinov.

Na sliki 18 so vrisane poprečne temperature izpušnih plinov pri posameznih ciklih ter najnižje in najvišje temperature, ki se pojavljajo v enem testu. Vidimo, da se temperatura izpušnih plinov dviga od prvega do četrtega cikla in da se razlika med posameznimi cikli zmanjšuje proti koncu testa. Na sliki 10 je še lepše razvidna krivulja temperature izpušnih plinov, ki se dviga od začetka proti koncu testa. Takšen potek je posledica ogrevanja motorja. Po daljšem času obratovanja bi temperaturna razlika med posameznimi cikli izginila. Temperatura izpušnih plinov, kakor jo kaže slika 10, niha med posameznim ciklom, kar je posledica nihanja temperature delovnega zraka in s tem nihanja temperature zgorevalnega procesa. Temperatura delov-



Sl. 18. Temperatura izpušnih plinov v odvisnosti od temperature delovnega zraka pri dvojni obremenitvi

$\bar{t}$  — poprečna temperatura  
 $t_{\max}$  — najvišja temperatura testa  
 $t_{\min}$  — najnižja temperatura testa  
 $\bar{t}_n$  — poprečna temperatura testa pri normalni obremenitvi

nega zraka torej niha, kakor je tudi razvidno s slike 3, kar je posledica nezmožnosti grelnika (slika 3), da ogreje ves zrak, ki ga motor vsesava. Posebej je to izrazito v fazi pospeševanja, ko je pretok zraka največji. Zato je najnižja temperatura izpušnih plinov v prvem ciklu pri mrzlem motorju. Najvišja temperatura je v četrtem ciklu, ko je dosežena približno obratovalna temperatura motorja (slika 10). Temperatura izpušnih plinov pri normalni obremenitvi je nižja kakor pri dvojni obremenitvi (pikčasta krivulja na sliki 18), kar je posledica manjše toplotne obremenitve motorja pri normalni obremenitvi.

## 12. SKLEP

Na vozilu FIAT 126 z motorjem Steyer-Puch so bili opravljeni preizkusi po predpisih za izvajanje evropskega testa, da bi ugotovili vpliv temperature delovnega zraka in obremenitve na porabo goriva in emisijo izpušnih plinov. Rezultati so vrednoteni po predpisih za izvajanje evropskega testa in za posamezne faze nestacionarnega obratovanja po shemi evropskega voznega cikla.

Povišanje temperature delovnega zraka vpliva na povečanje porabe goriva nad določeno temperaturo delovnega zraka 45 °C (slika 4). Povišanje temperature delovnega zraka povzroča, da se emisija CO najprej večja, emisija CH pa najprej manjša, nato po določeni temperaturi, ko postane gostota delovnega zraka tako majhna, da se pojavlja prebogata zmes goriva in zraka, povzroča povečanje emisije CH in zmanjšanje emisije CO (slika 9).

S povečanjem obremenitve se poveča poraba goriva, prav tako pa tudi emisija CO in CH ter prostornina izpušnih plinov (sliki 4 in 9), kar je posledica večjega kota odprtja dušilne lopute in temu ustrezno večjega pretoka zmesi goriva in zraka.

Poraba goriva v različnih fazah nestacionarnega obratovanja je sorazmerna kotu odprtja dušilne lopute. Ustrezno temu ima faza prostega teka najmanjšo porabo, malenkostno večja poraba je v fazi

pojemanja. Največja poraba goriva je v fazi pospeševanja in nekaj manjša je v fazi konstantne hitrosti (slika 5), kar se ujema z večjim kotom odprtja dušilne lopute in prispevkom pospeševalne črpalke v fazi pospeševanja.

Koncentracija CO pri različnih fazah nestacionarnega obratovanja je najmanjša v fazi prostega teka (pribl. 11 %), sledita ji faza pojemanja (pribl. 21 %) in faza pospeševanja (pribl. 26 %). Največja koncentracija CO je v fazi konstantne hitrosti (pribl. 42 %). Masna emisija CO je najmanjša v fazi prostega teka (pribl. 2 %), sledita ji faza pojemanja (pribl. 5 %) in faza pospeševanja (pribl. 44 %). Največja masna emisija CO se pojavlja v fazi konstantne hitrosti (pribl. 49 %).

Koncentracija CH pri različnih fazah nestacionarnega obratovanja je najmanjša v fazi prostega teka (pribl. 19 %), sledita ji faza pospeševanja (pribl. 21 %) in faza konstantne hitrosti (pribl. 25 %). Največja koncentracija CH se pojavlja pri fazi pojemanja (pribl. 35 %). Masna emisija CH je najmanjša v fazi prostega teka (pribl. 4 %), sledita ji faza pojemanja (pribl. 14) in faza pospeševanja (pribl. 37 %). Največja masna emisija CH je v fazi konstantne hitrosti (pribl. 45 %).

Razlike med koncentracijsko in masno emisijo CO in CH v izpušnih plinih so posledica različnih prostornin izpušnih plinov v različnih fazah obratovanja.

Koncentracija CO<sub>2</sub> je največja v fazi prostega teka, sledita ji faza konstantne hitrosti in pojemanja. Najmanjše vrednosti so v fazi pospeševanja.

Temperatura izpušnih plinov v odvisnosti od temperature delovnega zraka se najprej viša do določene temperature delovnega zraka, nato zopet niža ustrezno temperaturam motorja oz. gostoti delovnega zraka. Temperatura izpušnih plinov se viša tudi s povečano obremenitvijo motorja (slika 18).