

12. TOPLINSKA ISKORISTIVOST I STUPNJEVI DJELOVANJA

Toplinska iskoristivost motora SUI može se odrediti matematički ili grafički.

12.1 Matematički izraz toplinske bilance

Toplinska iskoristivost može se matematički odrediti prema jednadžbi:

$$\eta_t + \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{P_t \cdot 3600}{G_t \cdot H_d}$$

Od dovedene količine topline po kilovatu u obliku kemijske energije goriva teorijski se koristi samo 3 600 kJ, a troši se $G \cdot H_d$ kJ. Izrazom η može se odrediti bilo koja nepoznanica uz ostale poznate vrijednosti. Veličine mogu biti teorijske, indicirane ili efektivne.

Primjer: Izračunajte efektivnu snagu dizel-motora ako troši 2 100 kg goriva na sat, toplinske vrijednosti 42 000 kJ / kg. Efektivni stupanj djelovanja motora $\eta_e = 0,45$.

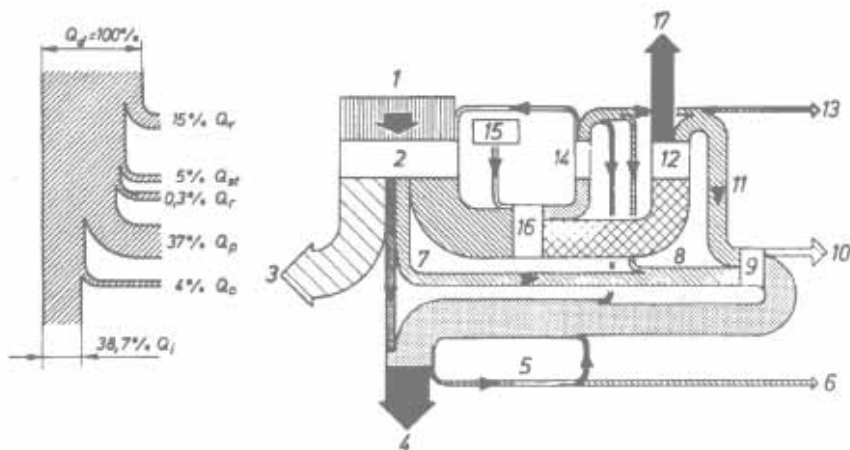
$$P_e = 11\,025 \text{ kW}$$

Iz zadanog primjera izračunajte specifični potrošak goriva. Odredite potrebnu količinu goriva za putovanje od 1 000 NM, ako brod razvija brzina 19 NM/h i ako je predviđena rezerva od 10%.

Specifični potrošak $g = 190,47 \text{ g/kW h}$
potrebna količina goriva za određeno putovanje $G = 100\,250,3 \text{ kg} = 110,25 \text{ t}$.

12.2 Grafički prikaz toplinske bilance

Toplinska bilanca najjednostavnije se može prikazati *Sankeyevim dijagramom* (sl. 12.1). Od dovedene količine topline $Q_d = 100\%$ u motoru se iskorištava za pogon osovine samo $Q_i = 38,7\%$ (toplina je ekvivalentna efektivnoj snazi motora). Ostali dio topline odvođi se: 15% rashladnom vodom, 5% rashladnim sredstvom za hlađenje stapova, 0,3% rashladnim sredstvom za hlađenje sapnica raspršivača, 37% ispušnim plinovima i oko 4% isijavanjem topline. Zbroj odvedene količine topline iz motora je 61,3%, dakle iskorištavanje energije od dovedene 100% je svega 38,7%. Pokusima se može približno točno ustanoviti odvođenje topline rashladnim sredstvom i ispušnim plinovima, ali odvođenje topline isijavanjem i nepotpunim izgaranjem praktički je nemoguće.



Sl. 12.1. Dijagram toka energije standardnih strojnih uređaja

1-dovod goriva uređaju (100%); 2-glavni stroj; 3-propulzija (38,7%); 4-gubitak energije rashladnom vodom (15%); 5-rashladnik generatora; 6-gubitak energije u rashladniku generatora (0,3%); 7-energija za pripremu goriva; 8-dodatna energija za pripremu i održavanje goriva; 9-grijač goriva; 10-gubitak energije za pripremu goriva (5%); 11-zagrijana voda iz kotla; 12-kotao na ispušne plinove; 13-gubitak energije u rashladniku ispušnog zraka i ostali gubici (4%); 14-rashladnik ispušnog zraka; 15-čistilac ispušnog zraka; 16-turbopuhalo; 17-gubitak energije s ispušnim plinovima (37%)

12.3 Toplinski stupanj djelovanja

To je odnos rada dobivenog u teorijskom procesu prema toplini dovedenoj tom procesu, tj.:

$$\eta_t = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

12.4 Stupanj savršenstva η_s — unutrašnji gubici

Stupanj savršenstva je odnos između indicirane i teorijske korisnosti, odnosno između indicirane i teorijske snage motora:

$$\eta_s = \frac{Q_i}{Q_1} = \frac{P_i}{P_t}$$

Razlika između teorijske i indicirane snage uvjetovana je unutrašnjim gubicima koji se sastoje od zaostalih izgaranih plinova u cilindrima motora, radnje potrebne za vršenje ispuha i usisa, gubitka za prestrujavanje zraka kod motora s pretkomorama i strujnim komorama izgaranja goriva, gubitka plinova zbog propustivosti topline na okolinu i rashladnu vodu, nepotpunog izgaranja goriva (događanja) itd. Stupanj savršenstva iznosi 75% do 94%.

12.5 Indicirani stupanj djelovanja

To je odnos toplinskog ekvivalenta inducirane snage motora i topline stvarno dovedene motoru:

$$\eta_i = \frac{Q_i}{Q_d}$$

Na indicirani stupanj djelovanja ne utječu nikakve nove promjene, osim onih već spomenutih pri određivanju toplinskog stupnja savršenstva (η i η_s). Indicirani stupanj djelovanja je, dakle, umnožak između teorijskog i stupnja savršenstva, tj.:

$$\eta_i = \eta_t \cdot \eta_s$$

12.6 Mehanički stupanj djelovanja

Mehanički stupanj djelovanja je odnos između efektivne i indicirane snage motora, odnosno omjer između srednjeg efektivnog i indiciranog tlaka, a određuje vlastiti otpor u motoru:

$$\eta_m = \frac{P_e}{P_i} \text{ ili } \eta_m = \frac{P_{se}}{P_{si}}$$

Ovi gubici računaju se samo za sporohodne motore kod kojih se mogu snimiti indikatorski dijagrami.

Mehanički gubici se sastoje od:

- radnje trenja svih pokretnih dijelova
- hidrauličkih gubitaka, koji se sastoje od otpora gibajućih masa u zraku i tekućem sredstvu (ulje ili voda)
- pogonske radnje razvodne osovine, regulatora, sisaljke goriva, mazivog ulja, rashladne vode itd.
- pogonske radnje svih strojeva i uređaja koji nisu privješeni uz motor, a služe za pogon
- gubitaka zbog strujanja zraka i izgaranih plinova.

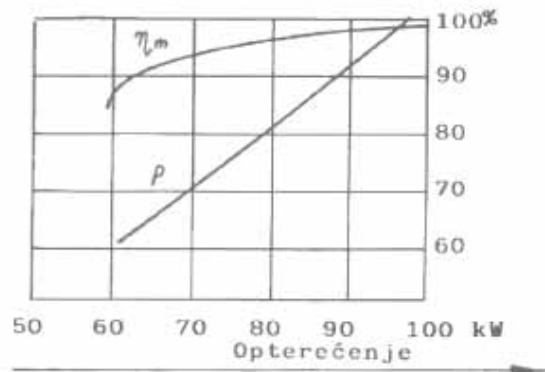
Mehanički gubici povećavaju se s povećanim tlakovima plina, srednjim efektivnim tlakom p_{si} i srednjom brzinom stapa.

Radnja trenja stapa i stapnih prstenova na košuljici iznosi $\frac{1}{2}$ od ukupne radnje trenja (motor bez križne glave). Vrijednosti mehaničkog stupnja djelovanja približno iznosi 80 do 98%.

Snaga potrebna za svladavanje ukupnog vlastitog trenja motora P_{tr} približno je neovisna o njegovu opterećenju.

$$P_{tr} = P_i - P_e = (1 - \eta_m) \cdot P_i \equiv \text{kons.}$$

S opterećenjem motora mehanički stupanj djelovanja se povećava (sl. 12.2).



Sl. 12.2. Mehanički stupanj u ovisnosti o opterećenju stroja

Mehanički stupanj djelovanja može se odrediti empirijski

$$\eta_m = 1 - \frac{0,185 \cdot \sqrt[3]{c_s} \cdot \sqrt{p^k}}{p_{st}}$$

$$c_s = \frac{2 \cdot s \cdot n}{60} = \frac{s \cdot n}{30} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Primjer: Izračunajte mehanički stupanj djelovanja ako je srednji efektivni tlak

$$p_{se} = 55 \cdot 10^4 \text{ Pa}, p^k = 400 \cdot 10^4 \text{ Pa} \text{ i } c_s = 8 \text{ m/s.}$$

$$\eta_m = 1 - \frac{0,185 \cdot \sqrt[3]{c_s} \cdot \sqrt{p^k}}{p_{st}}$$

$$c_s = \frac{2 \cdot s \cdot n}{60} = \frac{s \cdot n}{30} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\eta_m = 1 - \frac{0,185 \cdot \sqrt[3]{8} \cdot \sqrt{400}}{55}$$

$$\eta_m = 1 - \frac{7,4}{55} = 1 - 0,13 = 0,87.$$

12.7 Efektivni stupanj djelovanja η_e

Efektivni stupanj djelovanja η_e pokazuje odnos utrošene energije i stvarno dobivene radnje na prirubnici koljenastog vratila motora prema uvedenoj energiji u motor, tj. sposobnost motora da primljenu energiju goriva pretvori u mehaničku radnju.

Efektivni stupanj djelovanja η_e ovisi dakle o svim fazama pretvorbe energije tijekom radnog procesa, o gubicima u motoru, o mehaničkim gubicima motora

itd. pa se zato može pisati kao umnožak svih do sada navedenih stupnjava djelovanja. U izrazu nema η_i , jer je on umnožak η_t i η_m .

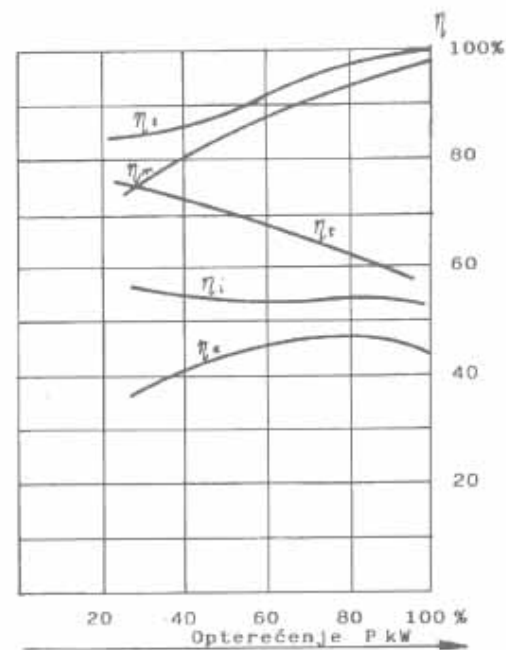
Efektivni stupanj djelovanja motora SUI iznosi 35 do 55%. Može se izračunati i iz matematičkog izraza toplinske bilance motora, tj.:

$$\eta_e = \frac{P_e \cdot 3600}{G \cdot H_d} \quad \text{ili} \quad \eta_e = \eta_t \cdot \eta_s \cdot \eta_m.$$

S promjenom opterećenja motora mijenjaju se iznosi pojedinih stupnjeva djelovanja (sl. 12.3). Stupanj savršenstva i mehanički stupanj djelovanja povećavaju se s opterećenjem, a od 80 do 100% kod ovog tipa motora imaju vrijednost 0,97. Toplinski stupanj djelovanja od 0,6 kod 25% opterećenja smanjuje se na vrijednost 0,53 kod 100% opterećenja. Indicirani stupanj djelovanja s opterećenjem malo se mijenja, a najpovoljniji je kod 80% opterećenja. Dakle, ekonomska snaga ovog motora je pri najpovoljnijem efektivnom stupnju djelovanja, tj. 0,48.

Primjer: Izračunajte efektivni stupanj djelovanja motora ako motor razvija 1 000 kW, a pri tome troši 170 g goriva po kW h ogrjevne vrijednosti $H_d = 41\,860 \text{ kJ/kg}$.

$$\eta_e = \frac{P_e \cdot 3600}{G \cdot H_d} = \frac{1000 \cdot 3600}{0,170 \cdot 41860} = 0,50$$



Sl. 12.3. Ovisnost stupnjeva djelovanja o opterećenju stroja

13. POTROŠAK I MJERENJE POTROŠKA GORIVA

13.1 Specifični potrošak goriva

Specifični potrošak goriva po kW h izražen u gramima (g/kW h).

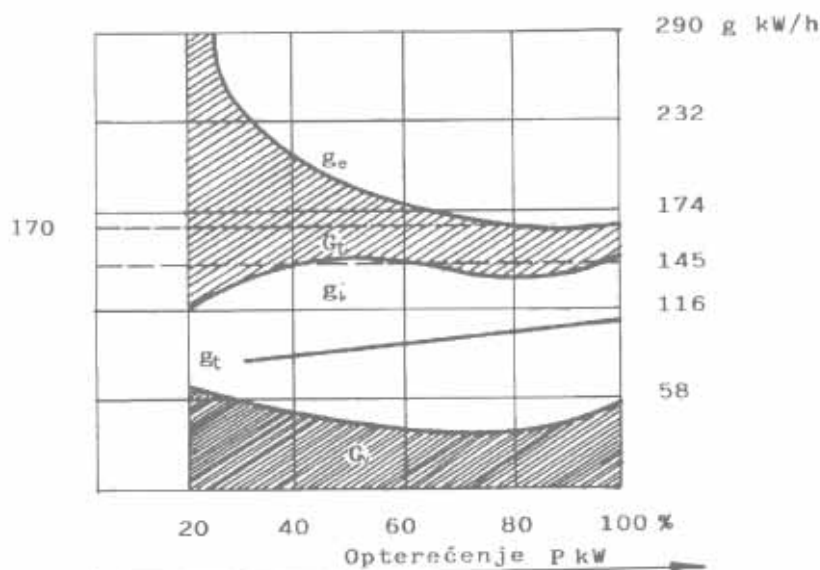
Specifični potrošak goriva kod motora SUI dijelimo na:

- teorijski specifični potrošak (g_t)
- indicirani specifični potrošak (g_i)
- efektivni (ekonomski) specifični potrošak (g_e).

Specifične potroške možemo odrediti iz izraza matematičke toplotne bilanse, tj.:

$$g = \frac{P \cdot 3600}{\eta \cdot H_d} \text{ kg/h ili } g = \frac{G}{P} = \text{kg} / \text{kWh} .$$

Površina G_n označava energiju izraženu u gramima goriva, koju motor troši na svladavanje vlastitih mehaničkih otpora (sl. 13.1). Plošina G_v označava gubitak rashladnom vodom također izražen u gramima goriva. Najpovoljniji je specifični ekonomski potrošak goriva kod 80% opterećenja motora. U našem primjeru iznosi oko 170 g/kW h.



Sl. 13.1. Dijagram potroška goriva u ovisnosti o opterećenju stroja

Kod djelomičnog opterećenja višak specifičnog potroška goriva prema punom opterećenju iznosi:

Opterećenje motora	100%	75%	50%	25%
Kod oto-motora benzin	100%	100%	119%	252%
Kod dizel-motora nafta	100%	100%	116%	168%

Kod suvremenih dizel-motora ekonomski potrošak manje se mijenja s opterećenjem, približno 15 do 25 g.

13.2 Mjerenje potroška goriva

Za vrijeme održavanja pogona potrebna je stalna kontrola potroška goriva, jer se tako provjerava ekonomičnost postrojenja i vodi briga o održavanju. Za temeljnu analizu radnog procesa motora, nije mjerodavan samo efektivni potrošak već moramo računati i s indiciranim potroškom. Mehanički stupanj djelovanja upravo je razmjernan indiciranom, a obrnuto razmjernan efektivnom potrošku goriva.

Efektivna snaga na spojci motora određuje efektivni potrošak, a indicirana snaga (nad stapom) indicirani potrošak $P_e \rightarrow g_e$; $P_i \rightarrow g_i$.

Efektivna snaga motora je snaga predana spojci koljenastog vratila, u kojoj je izračunata i snaga svih pomoćnih uređaja i naprava koje služe za održavanje pogona, a pogon koriste od samog motora. Ako ti uređaji i naprave imaju samostalan pogon, njihova se radnja mora oduzeti od snage na spojci da bi se dobila efektivna snaga motora. Ako se pomoćni uređaji pogone energijom od topline motora, njihova radnja se ne odbija od radnje dobivene na spojci koljenastog vratila.

Indicirana snaga je snaga nad stapom motora, a njezino određivanje nam je poznato iz prethodnog gradiva.

Radnja trenja je radnja trenja motora te svih pomoćnih uređaja i naprava koje služe za pogon motora:

$$P_v = (P_i + P_p) - P_e .$$

Efektivna se korisna snaga, dakle, može odrediti:

- bez pomoćnih strojeva, ako je izravno spojen električni generator s motorom:

$$P_e = \frac{P_{el}}{\eta_{el}} \text{ [kW]} .$$

η_{el} — stupanj djelovanja generatora

- s pomoćnim strojevima; snagu za pomoćne strojeve P_p daju posebni strojevi

$$P_e = \frac{P_{el}}{\eta_{el}} - P_p$$

- električnim pogonom pomoćnih strojeva od elektrogeneratora.

Za točno mjerenje potroška goriva motor se mora za cijelo vrijeme mjerenja nalaziti u stanju postojanosti, tj. moraju biti konstantne temperature ulja, vode, ispuha, okolnog zraka, kao i zraka u ispiromu i ispušnom sabirniku.

Postojanost motora može se postići u vremenu od $\frac{1}{2}$ do 1 sata vožnje, a kod

sporohodnih motora vrijeme je nešto duže.

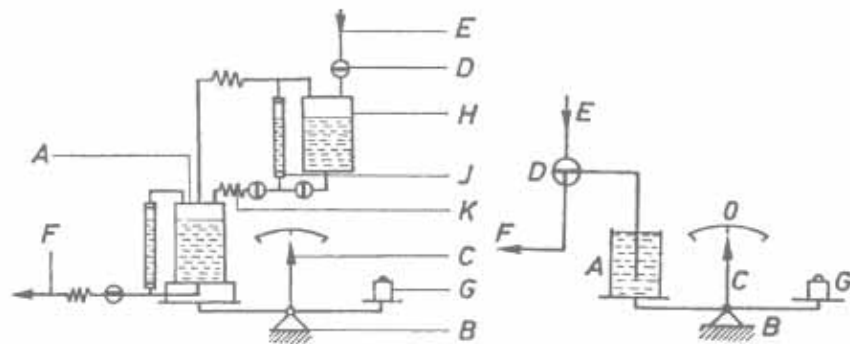
Mjerenje potroška tekućeg goriva može se provesti:

- mjerenjem količine potrošnog goriva u određenom vremenu
- mjerenjem vremena u kojem je potrošena određena količina goriva
- neposrednim određivanjem potroška u jedinici vremena.

U svim se slučajevima može mjeriti masa ili volumen goriva.

13.2.1 Mjerenje mase goriva pomoću zatvorene posude

Gorivo se sisaljkom dovodi kroz cijev *E* i ventil *D* u posudicu *H*. Kroz ventil *D* i fleksibilnu cijev *K* puni se mjerna posuda *A*. Masa goriva mjeri se vagonom *B* i utegom *G* (sl. 13.2). Izjednačenje tlaka zraka iznad razine goriva u posudici *H* i *A* omogućuje se fleksibilnim cijevima *K* i naftopokazivačima *J*. Cijevima *F* i *K* i ventilom *D* mjerna posudica se spaja sa sustavom visokotlačnih sisaljki goriva motora. Kazaljka *C* zauzet će krajnji lijevi položaj kad se uteg *G* ukloni. Kada se potroši izmjerena količina goriva, kazaljka *C* bit će ponovno u nultom položaju. Isto načelo mjerenja težine goriva pomoću otvorene posudice prikazano je na sl. 13.3. Gorivo se u posudici *A* dovodi kroz trosmjerni pipac *D* i cijev *E*, a iz posudice odvodi k motoru pipac *D* i cijev *F*.



Sl. 13.2. Mjerenje težine goriva pomoću zatvorene posude

Sl. 13.3. Mjerenje težine goriva u zatvorenoj posudi

13.2.2 Mjerenje volumena potrošenog goriva

Za mjerenje volumena upotrebljava se baždarena staklena posuda. Mjerenje počinje i završava u najužem dijelu presjeka M_1 i M_2 , jer je očitavanje, zbog naglog pada razine, najtočnije (sl. 13.4).

Mjeri se tako da se ustanovi vrijeme u kojem se razina goriva spusti od M_1 do M_2 . Ako se upotrijebe limene posude za kontrolu promjene razine, ugrađuje se stakleni naftokaz *C*. Gorivo se dovodi kroz cijev *E*, a odvodi iz posudice preko trosmjernog pipca *D* i cijevi *F*.

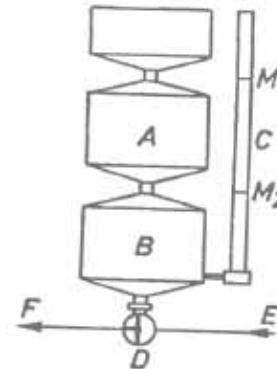
Točnost mjerenja je u granicama od $\pm 0,3$ do $0,5\%$.

Masa potrošenog goriva u jedinici vremena može se odrediti na sljedeći način:

$$m_g = \frac{V_g \cdot \rho_g}{t} \text{ [kg / s]},$$

$$m_g = \frac{V_g \cdot \rho_g \cdot 3.600}{t} \text{ [kg / h]}.$$

$V_g \text{ m}^3$ — mjerenje volumena,
 $\rho \text{ kg/m}^3$ — gustoća goriva,
 $t \text{ s}$ — vrijeme mjerenja.



Sl. 13.4. Mjerenje volumena potrošenog goriva

13.2.3 Mjerenje potroška na jedinicu vremena

Ovo mjerenje postiže se pomoću sapnica koje moraju biti baždarene na određenu gustoću goriva. Mjerenje je ovisno o temperaturi pa u brodskoj izvedbi služi više za kontrolu potroška. Ovi mjerači slični su mjerilima potroška vode u kućanstvu.

Potrošak goriva računa se u kg/h , a specifični u g/kW h .

Pitanja za ponavljanje

1. Što je specifični potrošak goriva i kako se određuje?
2. U kojim se granicama kreće specifični potrošak goriva kod današnjih dizelmotora?
3. Kako i kojim napravama se mjeri potrošak goriva?
4. Po kojem se izrazu može odrediti masa utrošenog goriva poznavajući volumen potrošenog goriva, njegovu gustoću i vrijeme potroška?
5. Za putovanje od 1 000 NM odredi količinu goriva, ako se radi o brodu koji vozi brzinom 15 NM/h, ako je u brodu instaliran porivni motor snage 5 000 kW. Specifični potrošak goriva iznosi 165 g/kWh . Zaliha neka bude 10%.
 Rješenje: 60,5 tona.