

UDK 621.43:621.432:621.438:536.2

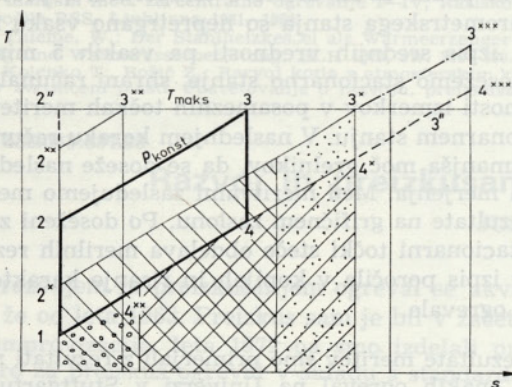
Motorji z notranjim zgorevanjem in regeneracija toplote

RADISLAV PAVLETIČ

1. REGENERACIJA TOPLOTE

Regeneracija toplote je pri toplotnih strojih že znano sredstvo za izboljšanje izkoristka procesa pretvarjanja toplote v mehansko delo. Pod regeneracijo toplote razumemo znova vračanje v proces dela toplote, ki mora biti pri pretvorbi odvedena iz procesa. Z regeneracijo toplote se dviguje srednja temperatura od zunaj dovedene toplote, temperatura v okolico odvedene toplote pa se znižuje.

Kaj pomeni višji temperaturni nivo dovoda toplote, kako je dosegljiv in kdaj je regeneracija toplote mogoča, nas pouči slika 1, na kateri so shematično narisani krožni procesi, pri katerih poteka dovod in odvod toplote po izobarah, stiskanje in širjenje pa po izentropah. Procesi na sliki potekajo znotraj danih temperaturnih mej in zgornja meja je tudi najvišja temperatura procesa. Višanje temperaturnega nivoja dovoda toplote pomeni višanje temperature začetka dovoda, kar je dosegljivo ali z regeneracijo toplote ali z večanjem kompresijskega razmerja. Medtem ko je večanje kompresijskega razmerja vedno mogoče, je regeneracija toplote mogoča le, kadar je temperatura na koncu širjenja višja od temperature po stiskanju, kar pa je pri omejeni najvišji temperaturi procesa mogoče samo pri nižjih kompresijskih razmerjih od kompresijskega razmerja referenčnega krožnega procesa, narisane z debelimi črtami. Pri njem je temperatura na koncu stiskanja in širjenja enaka in proces ima tudi delovno sposobnost, ki je blizu največji mogoči.



Sl. 1. Krožni procesi znotraj danih temperaturnih mej
Temperatura T v odvisnosti od entropije S

Procesi, ki potekajo pri nižjih kompresijskih razmerjih, ponujajo možnost regeneracije in imajo tudi boljši izkoristek, vendar tudi manjšo delovno sposobnost. Z nadaljnjim zmanjševanjem kompresijskega razmerja limitirajo procesi v izobaro, pri danih temperaturnih mejah z največjim mogočim

izkoristkom, enakim izkoristku Carnotovega procesa, vendar z ničelno delovno sposobnostjo. Boljši izkoristek in manjšo delovno sposobnost imajo tudi procesi, ki potekajo pri višjem kompresijskem razmerju, ki regeneracije toplote ne dopuščajo in z nadaljnjim povečanjem kompresijskega razmerja limitirajo v izentropo z enakim najboljšim izkoristkom kakor proces z regeneracijo, ki degenerira v izobaro in prav tako z ničelno delovno sposobnostjo.

Procesi desno od referenčnega — z regeneracijo in levo od njega — brez regeneracije toplote imajo skupno lastnost, da se jim izkoristek povečuje, delovna sposobnost pa zmanjšuje. Med njimi pa vendar obstaja razlika. Procesom na desni se najvišji tlak znižuje, da v limitnem primeru — izobari doseže tlak začetne točke, procesom na levi pa se povečuje, da v limitnem primeru — izentropi doseže najvišji tlak. Procesi z regeneracijo toplote se lahko približajo, dosežejo in tudi presežejo delovno sposobnost, ki jo ima znotraj temperaturnih mej proces največje delovne sposobnosti le, če presežejo zgornjo temperaturno mejo.

2. NAPRAVE, KI OMOGOČAJO REGENERACIJO TOPLOTE

Regeneracija toplote v toplotnih strojih pomeni prenos toplote s strani odvoda na stran dovoda. Nosilci toplote na eni kakor na drugi strani so delovne snovi in s prenosom toplote med njimi je dosežena regeneracija toplote. Prenos toplote med dvema snovnima tokoma pa poteka v prenosniku toplote. Prenosnike, pri katerih se toplota prenaša iz enega medija na drugi prek sten, ki medija ločujejo in se medija pretakata po medsebojno povsem ločenih sklenjenih kanalih, imenujemo rekuperatorje za razliko od regeneracij, za katere je značilno, da teče snov, ki se ohlaja, kakor tudi snov, ki se segreva, skozi iste kanale v jedru prenosnika toplote. To je seveda mogoče samo, če so tokovi periodični, ali pa če se v tokove enega in drugega medija prenosnik toplote vključuje periodično, kar pomeni, da prenosnik v enem svojem segmentu toploto sprejema, se segreva, v drugem segmentu toploto oddaja, se ohlaja. Regeneracija toplote v toplotnih strojih ni odvisna od vrste prenosnika. Samo od procesa v stroju je odvisna uporaba enega ali drugega tipa ali pa je mogoča uporaba tudi obeh.

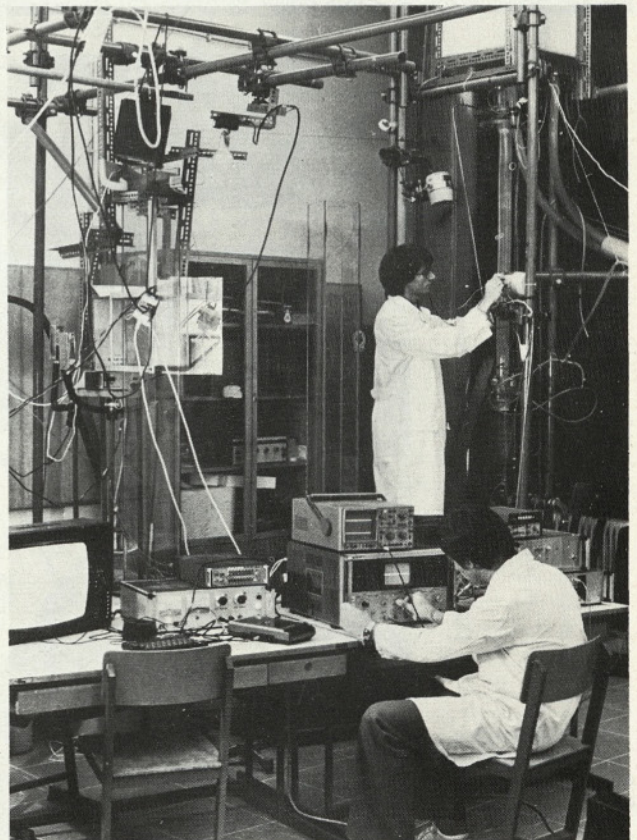
3. MOTORJI Z NOTRANJIM ZGOREVANJEM

Motorji z notranjim zgorevanjem so stroji, za katere je značilno, da je v proces dovedena toplota posledica zgorevanja goriva in zgorevanje poteka v samem pretočnem traktu stroja. Snov, ki je na

65 — 40 let
FAKULTETA ZA STROJNIŠTVO, LJUBLJANA

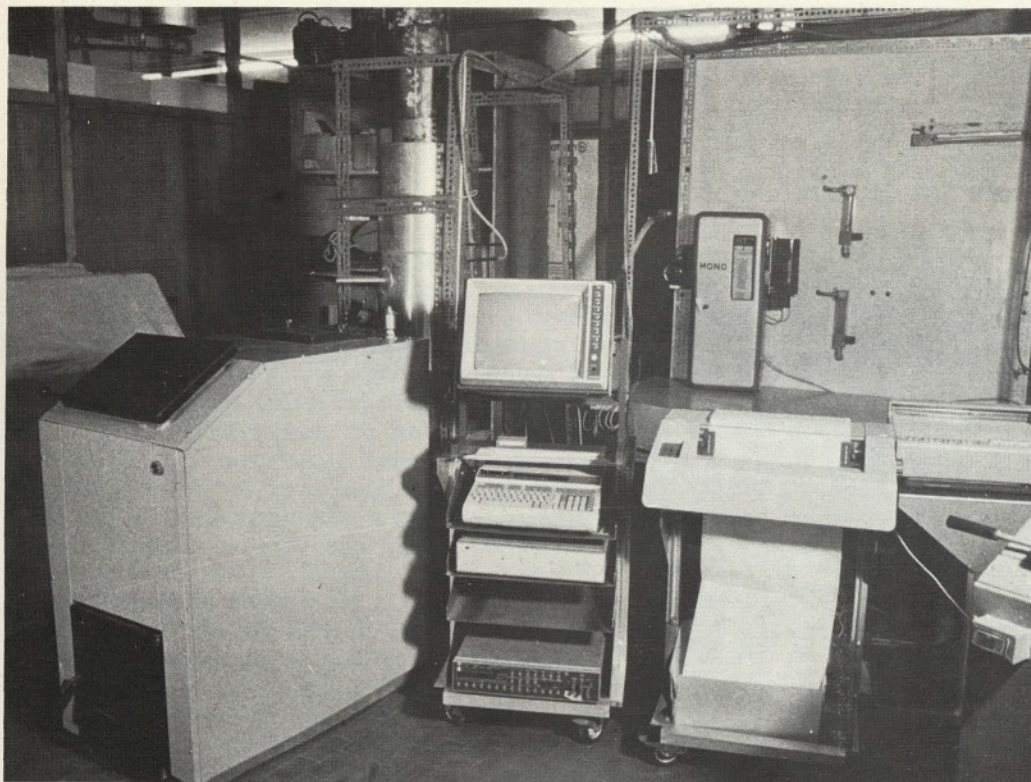


Gluha komora v laboratoriju PRE za energetska strojništvo

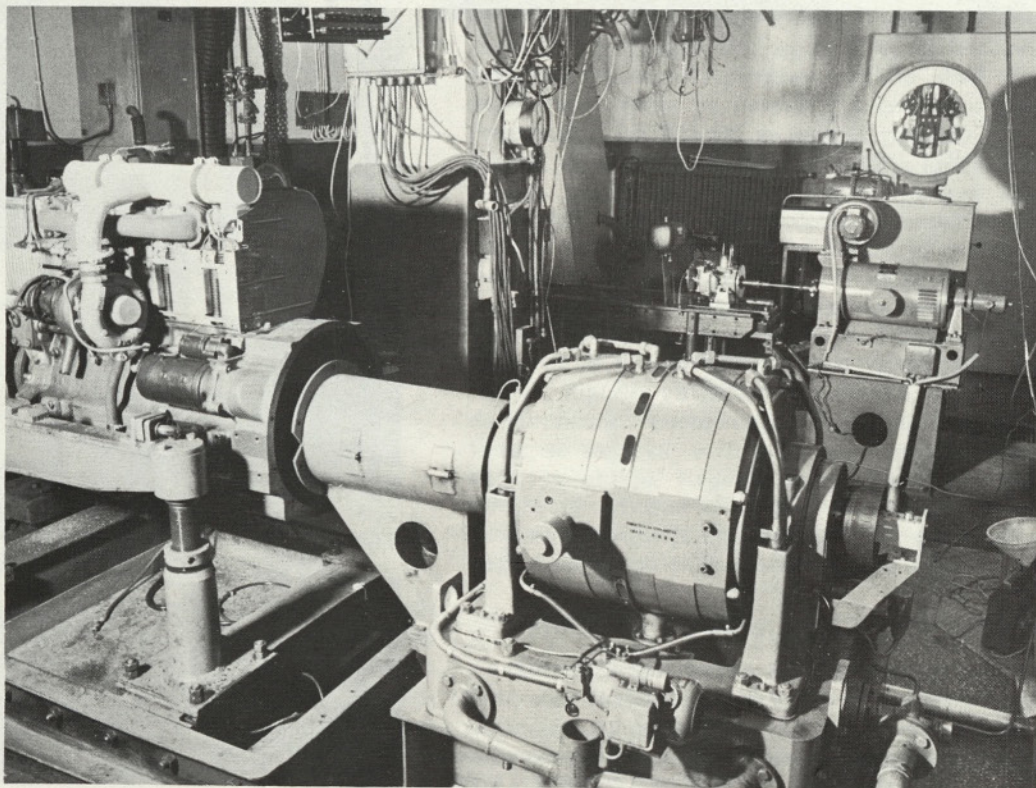


*Meritve transportnih lastnosti dvofaznega toka plin-kapljevina
v laboratoriju PRE za toplotno in procesno tehniko*

65 — 40 let
FAKULTETA ZA STROJNIŠTVO, LJUBLJANA



*Preizkuševališče
za razvoj kotlov
za centralno
ogrevanje
v laboratoriju PRE
za toplotno
in procesno tehniko*



*Preizkuševališče
za toplotne batne
stroje v laboratoriju
PRE za energetska
strojništvo*

vstopu v motor normalno zrak ali zmes zraka in goriva, v fazi zgorevanja doživlja snovne spremembe, da potem zapusti motor kot produkt zgorevanja. Ta ista snov je tudi delovna snov, ki gre na svoji poti skozi motor skozi določene veličine stanja, pri tem pa se toplotna energija preoblikuje v mehansko delo. Zaradi snovnih sprememb je treba delovno snov vedno znova dovajati v stroj kot svežo snov, iz stroja pa odvajati kot produkte zgorevanja, kar se dogaja nepretrgoma pri plinskih turbinah ali periodično pri batnih strojih.

Plinska turbina je omejena predvsem z najvišjo temperaturo procesa zaradi toplotnih obremenitev komponent stroja, ki so neprenehoma v stiku s toplimi plini, pa tudi z najvišjim tlakom, zlasti takrat, ko naj bi bila konstrukcija lahka (velika moč na enoto mase), kar se zahteva od turbin kot pogonskega stroja zemeljskih vozil in zračnih plovil.

4. PLINSKA TURBINA ZA POGON VOZIL

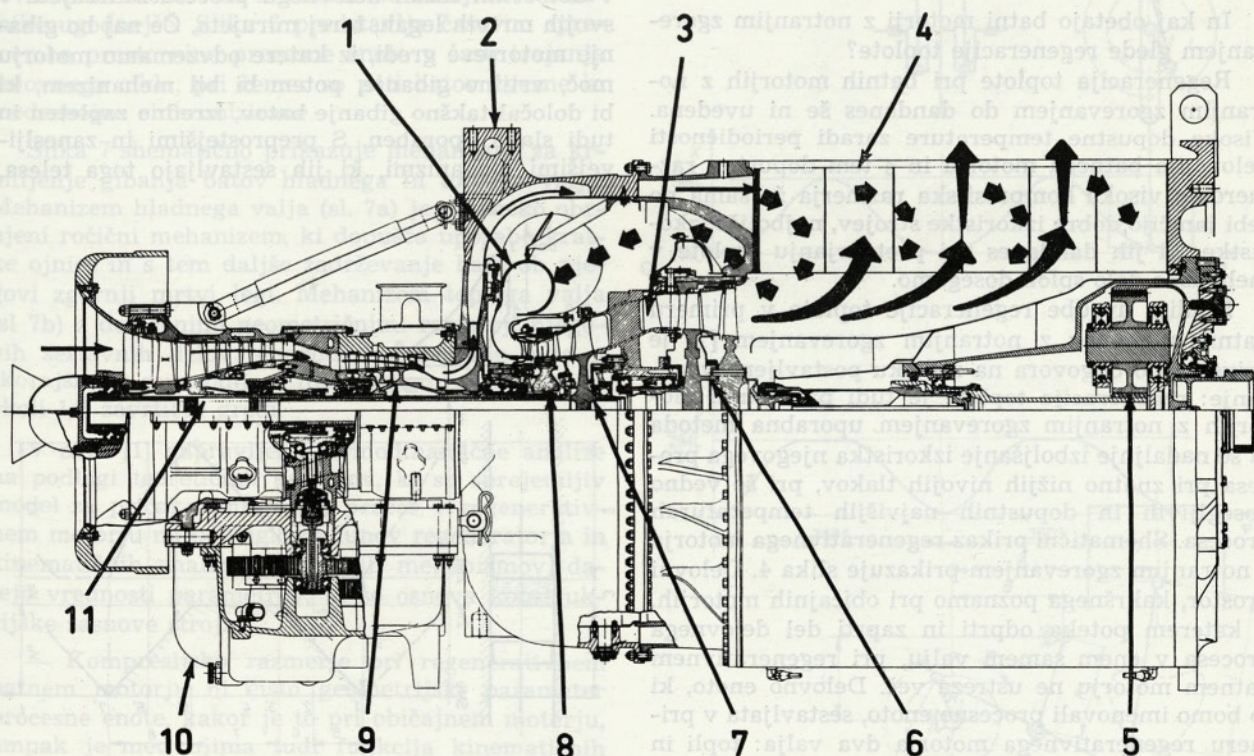
Plinske turbine za vozila, ki so poganjana prek kolesnega ali goseničnega stika z zemljiščem, naj toplotno energijo pretvarjajo v mehansko delo s čimboljšim izkoristkom, celo na račun manjše de-

lovne sposobnosti enote mase medija, ki se pretaka skozi stroj. Za tak namen je regeneracija toplote potrebna.

Za regeneracijo toplote je potreben prenosnik toplote, ki je lahko rekuperativnega ali regenerativnega tipa. Plinsko turbino za pogon vozil z rekuperatorjem prikazuje slika 2. Toplota prehaja iz izstopajočih plinov prek ločilnih sten na svež stisnjen zrak pri njegovem toku od kompresorja v gorilnik. Plinsko turbino z prenosnikom toplote regenerativnega tipa prikazuje slika 3. Regenerator je tukaj rotirajoče kovinsko jedro, skozi katero se izmenično pretakajo enkrat izpušni plini, drugič pa stisnjeni sveži zrak.

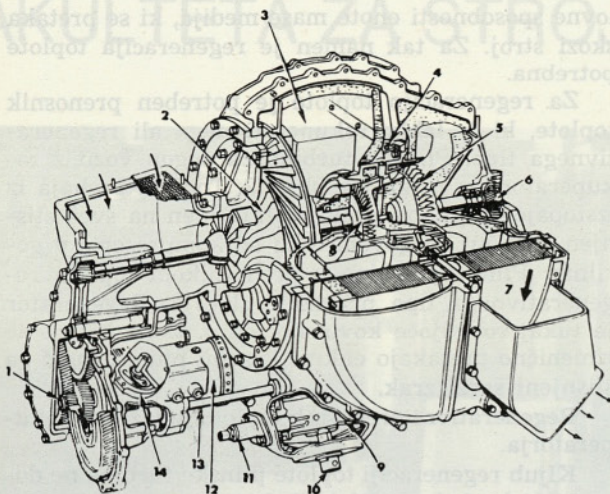
Regenerativni prenosnik toplote je lažji od rekuperatorja.

Kljub regeneraciji toplote plinske turbine ne dosegajo izkoristkov sodobnih batnih motorjev z notranjim zgorevanjem zaradi razmeroma nizke najvišje temperature procesa, ki jo še dopuščajo kovinski materiali turbinskega lopatja. Novi keramični materiali obetajo zvišanje temperature dovedenih plinov in s tem izboljšanje izkoristka, ki kaže, da se bo približal izkoristkom sodobnih batnih motorjev z notranjim zgorevanjem.



Sl. 2. Plinska turbina z rekuperatorjem (AVCO Lycoming)

1 — gorilnik in spirala, 2 — okrov difuzorja, 3 — stator turbine, 4 — rekuperator, 5 — zobniški reduktor, 6 — dvostopenjska turbina uporabne moči, 7 — turbina nizkega tlaka, 8 — turbina visokega tlaka, 9 — kompresor visokega tlaka, 10 — pogon pomožnih naprav, 11 — kompresor nizkega tlaka



Sl. 3. Plinska turbina z regenerativnim (Chrysler)

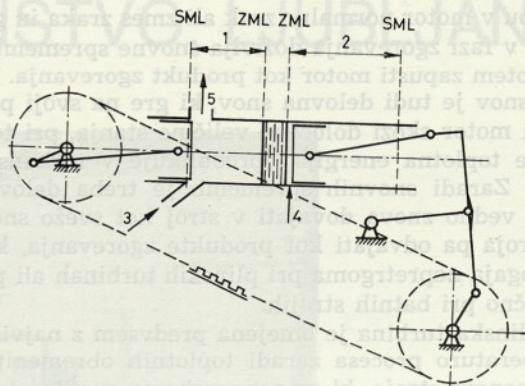
1 — pogon pomožnih naprav stroja, 2 — kompresor, 3 — regenerativni motor — v desno vrteče se jedro, 4 — mehanizem šobe spremenljivega preseka, 5 — turbinsko kolo uporabne moči, 6 — zobniški reduktor, 7 — regenerativni motor — v levo vrteče se jedro, 8 — turbinsko kolo — pogon kompresorja, 9 — gorilnik, 10 — gorivna soba, 11 — vžigalna svečka, 12 — zaganjalnik — generator, 13 — pogonska gred vrtečih se jeder regenerativnega motorja, 14 — vžigalna naprava

5. REGENERATIVNI BATNI MOTOR Z NOTRANJIM ZGOREVANJEM

In kaj obetajo batni motorji z notranjim zgorevanjem glede regeneracije toplote?

Regeneracija toplote pri batnih motorjih z notranjim zgorevanjem do dandanes še ni uvedena. Visoke dopustne temperature zaradi periodičnosti delovanja batnega motorja in s tem dopustna razmeroma visoka kompresijska razmerja že sama po sebi jamčijo dobre izkoristke strojev, najboljše izkoristke, ki jih dandanes pri pretvarjanju toplote v mehansko delo sploh dosegamo.

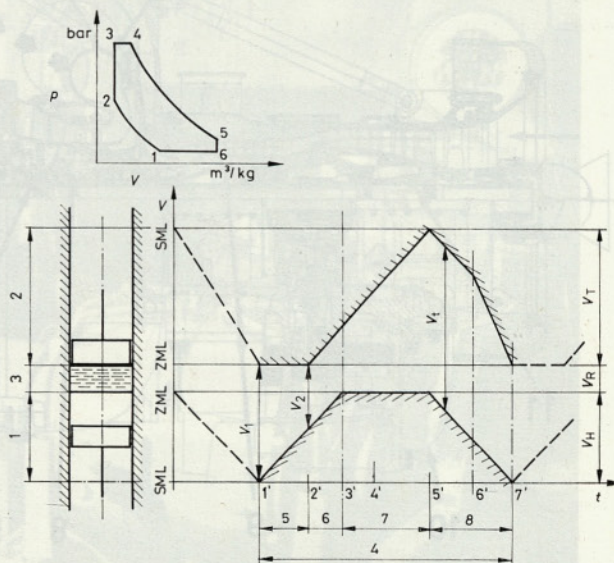
Študija uvedbe regeneracije toplote v primeru batnih motorjev z notranjim zgorevanjem [1] je privedla do odgovora na začetku postavljeno vprašanje: regeneracija toplote je tudi pri batnih motorjih z notranjim zgorevanjem uporabna metoda za še nadaljnje izboljšanje izkoristka njegovega procesa pri znatno nižjih nivojih tlakov, pri še vedno dosegljivih in dopustnih najvišjih temperaturah procesa. Shematični prikaz regenerativnega motorja z notranjim zgorevanjem prikazuje slika 4. Delovni prostor, kakršnega poznamo pri običajnih motorjih, v katerem poteka odprti in zaprti del delovnega procesa v enem samem valju, pri regenerativnem batnem motorju ne ustreza več. Delovno enoto, ki jo bomo imenovali procesna enota, sestavljata v primeru regenerativnega motorja dva valja: topli in hladni valj z regenerativnim motorjem med njima. Obstoj dveh valjev, ki imata lahko različni prostornini, dopušča na preprost način potek procesa s podaljšano ekspanzijo, kar pri običajnih motorjih dosegamo z motorju prigradenim strojem — navadno turbinskim strojem.



Sl. 4. Shematski prikaz regenerativnega batnega motorja z notranjim zgorevanjem

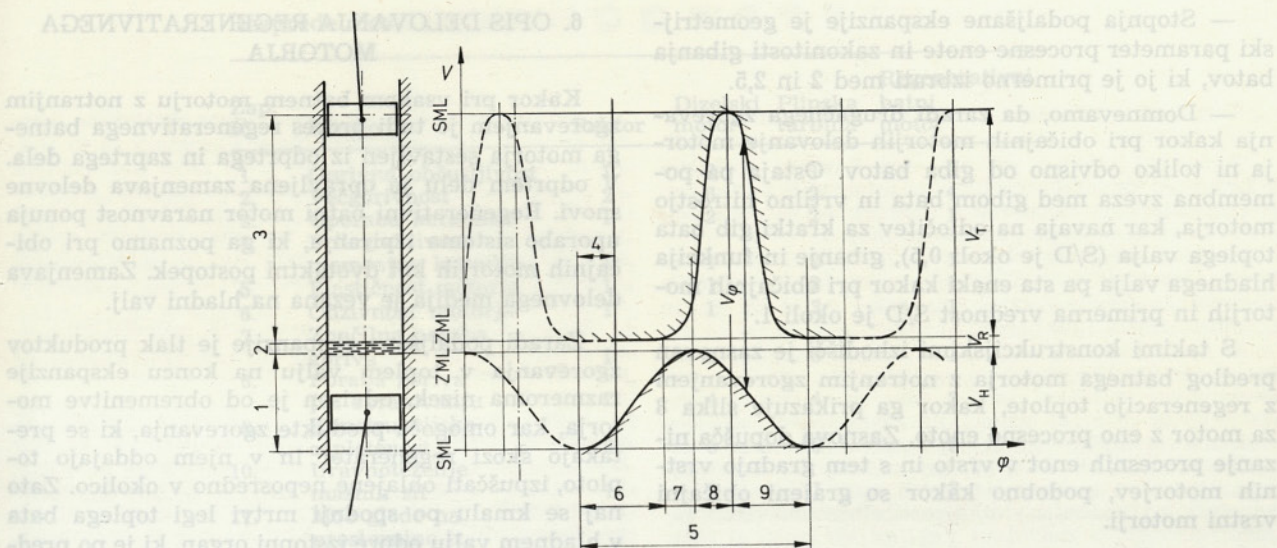
1 — hladni valj, 2 — topli valj, 3 — vstop, 4 — vbrizg goriva, 5 — izpuh, SML — spodnja mrtva lega, ZML — zgornja mrtva lega

Gibanje batov v obeh valjih in s tem spreminjanje prostornine procesne enote, mora biti usklajeno s procesom, kakor prikazuje slika 5 za teoretični proces, ki je tudi narisana na sliki. Dolžina med obema krivuljama, ki predstavljata poti batov v enem in drugem valju, pomeni na sliki trenutno prostornino v določenem trenutku procesa. Značilnost poti batov v diagramih je nezveznost in to, da se bata v določenih fazah delovnega procesa zadržujeta v svojih mrtvih legah, torej mirujeta. Če naj bo gibanje motorjeve gredi, iz katere odvezemamo motorju moč, vrtilno gibanje, potem bi bil mehanizem, ki bi določal takšno gibanje batov, izredno zapleten in tudi slabo uporaben. S preprostejšimi in zanesljivejšimi mehanizmi, ki jih sestavljajo toga telesa,



Sl. 5. Spreminjanje delovne prostornine pri izvaajanju teoretičnega procesa

Prostornina delovne snovi V v odvisnosti od časa t
1 — hladni valj, 2 — topli valj, 3 — regenerativni motor, 4 — trajanje cikla, 5 — komprimiranje, 6 — gretje, 7 — zgorevanje in ekspanzija, 8 — regenerativno hlajenje



Sl. 6. Spreminjanje delovne prostornine pri procesu pri-
rejenem zveznemu gibanju batov

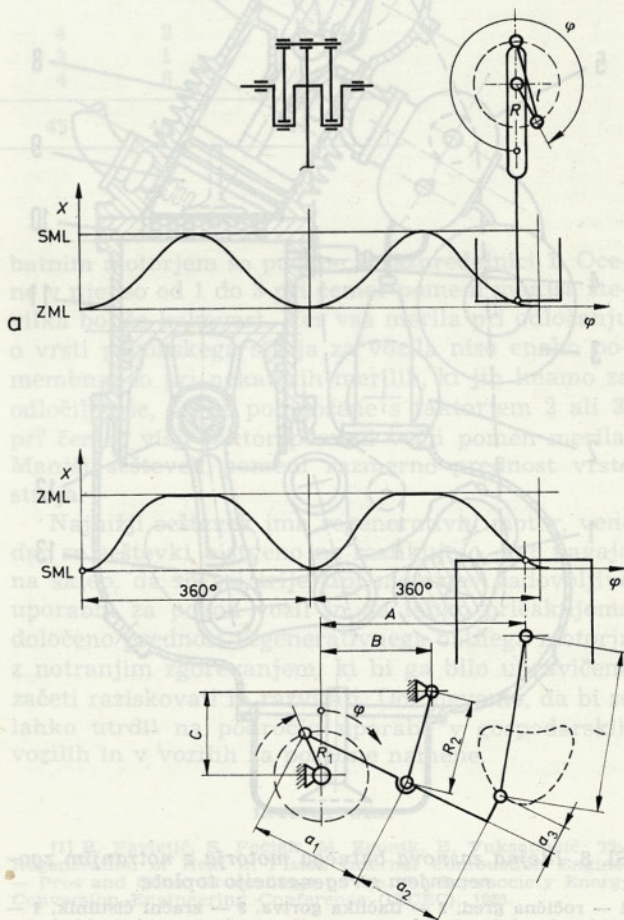
Prostornina delovne snovi V , v odvisnosti od časa t
1 — hladni valj, 2 — topli valj, 3 — regenerator, 4 — fazni
premik, 5 — trajanje cikla, 6 — komprimiranje, 7 — regenera-
tivno gretje, 8 — zgorevanje in ekspanzija, 9 — regenerativno
hlajenje in zamenjava

se takim potem batov lahko le približamo, poti batov napravimo zvezne in zato z vidika njihove dinamike ugodnejše. Slika 6 predstavlja časovno spremembo prostornine procesne enote v času trajanja delovnega cikla, pri čemer so poti batov zvezne in medsebojno sinhronizirane.

Slika 7 shematično prikazuje mehanizme za krmiljenje gibanja batov hladnega in toplega valja. Mehanizem hladnega valja (sl. 7a) je dejansko obrnjeni ročni mehanizem, ki dopušča uporabo kratke ojnice in s tem daljše zadrževanje bata ob njegovi zgornji mrtvi legi. Mehanizem toplega valja (sl. 7b) z določenimi geometričnimi razmerji njegovih sestavnih delov omogoča zadrževanje bata v skorajšnjem mirovanju v njegovi zgornji mrtvi legi okoli 1/3 zavrtitve gredi.

V delu [1] napravljene termodinamične analize na podlagi teoretičnih procesov, ki so sprejemljiv model za pričakovani realni proces v regenerativnem motorju na podlagi izračunov regeneratorja in kinematičnih analiz predlaganih mehanizmov, dajejo vrednosti parametrov, ki so osnova konstrukcijske zasnove stroja:

— Kompresijsko razmerje pri regenerativnem batnem motorju ni čisto geometrijski parameter procesne enote, kakor je to pri običajnem motorju, ampak je med njima tudi funkcija kinematičnih lastnosti batnih mehanizmov in faznega zamika. Na kompresijsko razmerje ima odločujoč vpliv razmernostni delež čiste prostornine regeneratorja in mrtvih prostorov. Ocenjujemo, da je pri sprejemljivi učinkovitosti regeneratorja nad 80 % dosegljivo kompresijsko razmerje med 4 in 5.



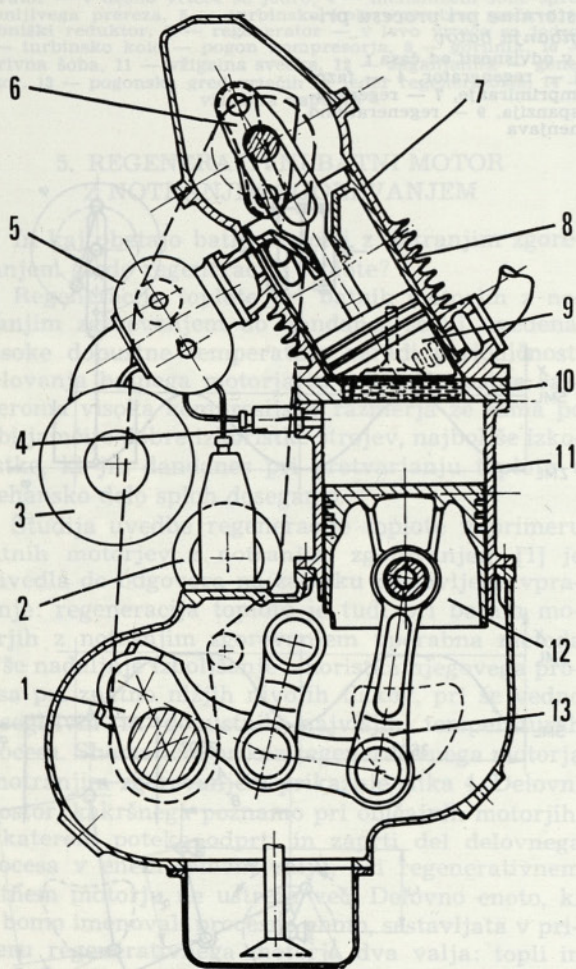
Sl. 7. Shematski prikaz mehanizmov batov

a — hladnega valja
b — toplega valja

— Stopnja podaljšane ekspanzije je geometrijski parameter procesne enote in zakonitosti gibanja batov, ki jo je primerno izbrati med 2 in 2,5.

— Domnevamo, da zaradi drugačnega zgorevanja kakor pri običajnih motorjih delovanje motorja ni toliko odvisno od giba batov. Ostaja pa pomembna zveza med gibom bata in vrtilno hitrostjo motorja, kar navaja na odločitev za kratki gib bata toplega valja (S/D je okoli 0,5), gibanje in funkcija hladnega valja pa sta enaki kakor pri običajnih motorjih in primerna vrednost S/D je okoli 1.

S takimi konstrukcijskimi izhodišči je zasnovan predlog batnega motorja z notranjim zgorevanjem z regeneracijo toplote, kakor ga prikazuje slika 8 za motor z eno procesno enoto. Zasnova dopušča nizanje procesnih enot v vrsto in s tem gradnjo vrstnih motorjev, podobno kakor so grajeni običajni vrstni motorji.



Sl. 8. Idejna zasnova batnega motorja z notranjim zgorevanjem z regeneracijo toplote

1 — ročična gred, 2 — tlačilka goriva, 3 — zračni čistilnik, 4 — vbrizgalna šoba, 5 — kompresor, 6 — mehanizem bata hladnega valja, 7 — hladni valj, 8 — puša hladnega valja, 9 — bat hladnega valja, 10 — regenerator, 11 — topli valj, 12 — bat toplega valja, 13 — mehanizem bata toplega valja

6. OPIS DELOVANJA REGENERATIVNEGA MOTORJA

Kakor pri vsakem batnem motorju z notranjim zgorevanjem je tudi proces regenerativnega batnega motorja sestavljen iz odprtega in zaprtega dela. V odprtem delu je opravljena zamenjava delovne snovi. Regenerativni batni motor naravnost ponuja uporabo sistema izpiranja, ki ga poznamo pri običajnih motorjih kot dvotaktni postopek. Zamenjava delovnega medija je vezana na hladni valj.

Zaradi podaljšane ekspanzije je tlak produktov zgorevanja v toplem valju na koncu ekspanzije razmeroma nizek, odvisen je od obremenitve motorja, kar omogoča produkte zgorevanja, ki se pretakajo skozi regenerator in v njem oddajajo toploto, izpuščati ohlajene neposredno v okolico. Zato naj se kmalu po spodnji mrtvi legi toplega bata v hladnem valju odpre izstopni organ, ki je po predlogu zasnove motorja na sliki 8 krmiljen z drsnim zasunom, in pomeni hkrati drsno pušo bata hladnega valja. Drsna puša je proti obrnjenemu ročičnemu mehanizmu zaprta in ob batnici tesnjena tako, da ustvarja zbiralnik svežega zraka. Vtekanje zraka v zbiralnik je lahko neposredno iz okolice, ker razlikovno gibanje bata proti drsni puši ustvarja v zbiralniku podtlak potem pa tudi nadtlak, ki omogoča iztekanje zraka. V tem primeru je izpiranje takšno, kakršno je pogosto uporabljeno pri dvotaktnih motorjih s kartersko črpalko, pri čemer je prav tako treba vstop zraka v zbiralnik krmiliti prisilno ali samodejno s primernimi zapornimi organi. Take razmere bi predstavljale »sesalno« razliko regenerativnega motorja, poleg te pa je mogoča tudi različica s tlačno polnitvijo, kjer bi mehansko gnano puhalo (npr. Rootsov kompresor) potiskalo zrak v zbiralnik, pri tem pa krmiljenje vtekanja zraka v zbiralnik ne bi bilo potrebno. V temenu bata je vgrajen nepovratni ventil, skozi katerega vteka v valj svež zrak, ko tlak v zbiralniku preseže tlak v valju v prostoru nad batom ki je odprt v okolico. Z zapiranjem izstopnega organa pred spodnjo mrtvo lego bata hladnega valja je mogoče doseči določeno stopnjo tlačnega polnjenja, odvisno od tlaka zraka, ki ga potiska puhalo. Faza zamenjave delovnega medija traja približno od trenutka, ko bat toplega valja zapusti svojo spodnjo mrtvo lego do trenutka, ko se bat hladnega valja približuje spodnji mrtvi legi, kar pomeni približno $2/5$ trajanja enega vrtilja motorne gredi. Delež zaostalih plinov v sveži snovi je v takih razmerah izpiranja odvisen predvsem od zaostalih plinov v prosti prostornini regeneratorja.

Fazi zamenjave delovnega medija sledi zaprti del delovnega procesa, ki začne s stiskanjem. Pri tem se bat hladnega valja premika proti svoji zgornji mrtvi legi, bat toplega valja pa naj takrat v svoji zgornji mrtvi legi miruje. Stiskanju sledi pretakanje stisnjenega zraka skozi regenerator v topli

Razpredelnica 1

Zap. št.	Merilo	Faktor	Dizelski motor	Plinska turbina	Regenerativni batni motor
1.	Gorivna občutljivost	1	3	1	2
2.	Večgorivnost	2	6	2	4
3.	Uporaba keramike	1	2	2	1
4.	Prilagodljivost momentne krivulje	1	1	2	1
5.	Elastičnost motorja	1	1	2	1
6.	Odzivnost motorja	1	1	3	1
7.	Značilna poraba goriva	1	2	3	1
8.	Poraba goriva pri obratovanju	2	4	4	2
9.	Konstruktivska zapletenost	3	3	6	9
10.	Uravnoteženje masnih sil	1	2	1	3
11.	Moč glede na prostornino iz vgrajitvenih mer	2	2	6	2
12.	Moč glede na maso stroja	1	2	1	2
13.	Zagonska pripravljenost	1	1	2	2
14.	Obratovalna zanesljivost in občutljivost	2	4	2	4
15.	Zahtevnost vzdrževanja	2	4	2	4
16.	Emisija NO _x	1	3	1	3
17.	Emisija hrupa	2	4	6	2
Seštevek			45	46	44

valj, katerega bat se že premika od svoje zgornje mrtve lege, da je pretakanje končano, kot bat hladnega valja doseže svojo zgornjo mrtvo lego. Medtem pa poteka v toplem valju vbrizgavanje goriva v zrak, segret v regeneratorju na temperaturo, ki povzroča zgorevanje. Zgorevanju sledi širjenje in začenja se nov delovni cikel zopet z zamenjavo delovnega medija.

SKLEP

Regeneracije toplote, ki je pri plinskih turbinah že uveljavljena, pri batnih motorjih z notranjim zgorevanjem še ne uporabljamo. Medtem ko so lastnosti motorjev z notranjim zgorevanjem batnega in turbinskega tipa na današnji stopnji razvoja znane, so lahko lastnosti batnega regenerativnega motorja z notranjim zgorevanjem po prej predstavljeni zamisli le ocenjene. Ocenjene so na podlagi analiz, ki so predvsem naslonjene na izkušnje z običajnimi motorji in na rezultate računskega modela procesa v regeneratorju, izposojenega iz prakse turbinskih strojev in Stirlingovega motorja.

Primerjalne ocene lastnosti med tlačno polnjenim dizelskim motorjem, plinsko turbino z regeneracijo toplote za pogon vozil in med regenerativnim

batnim motorjem so podane v razpredelnici 1. Ocene v njej so od 1 do 3 pri čemer pomeni manjša številka boljše kakovost. Ker vsa merila pri odločanju o vrsti pogonskega stroja za vozila niso enako pomembna, so pri nekaterih merilih, ki jih imamo za odločilnejše, ocene pomnožene s faktorjem 2 ali 3, pri čemer višji faktor pomeni večji pomen merila. Manjši seštevek pomeni razmerno prednost vrste stroja.

Najnižji seštevek ima regenerativni motor, vendar se seštevki bistveno ne razlikujejo, kar navaja na sklep, da so vsi trije tipi motorjev zadovoljivo uporabni za pogon vozil in da lahko pričakujemo določeno prednost regenerativnega batnega motorja z notranjim zgorevanjem, ki bi ga bilo upravičeno začeti raziskovati in razvijati. Domnevamo, da bi se lahko utrdil na področju uporabe v gospodarskih vozilih in v vozilih za posebne namene.

LITERATURA

[1] R. Pavletič, S. Pečjak, M. Zgonik, B. Vuksanović: The Regeneration of Heat in Piston Internal Combustion Engines — Pros and Cons; Proceedings of the 19th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (IECEC), 1985.

Avtorjev naslov: prof. dr. Radislav Pavletič, dipl. inž.
Fakulteta za strojništvo, Ljubljana