

DK 621.438.01

# Uvod v plinske turbine

BORIS ČERNIGOJ

Splošen opis. Vzorni proces. Prvo približanje stvarnemu procesu. Prosta moč. Izkoristek. Specifična poraba zraka. Dovajanje toplote.

Ljudje že od najstarejših časov sem izkoriščamo za olajšanje dela ali povečanje storilnosti različne vire energije. Razvoj je šel od najlažje dostopnih virov, kakor sta n. pr. veter ali tekoča voda, do težko dostopnih, kakor je n. pr. jedrska energija. Prvo veliko prelomnico v novejši zgodovini človeštva je prineslo odkritje izkoriščanja toplote goriv, ki se je začelo z Newtonovim atmosferskim strojem, nadaljevalo z Wattovim parnim strojem, z različnimi motorji z notranjim zgorevanjem in parnimi turbinami ter zaključilo s plinskimi turbinami in raketami.

Za začetek neke vrste stroja ne moremo jemati samih patentnih prijav daljnovidnih izumiteljev, ki jih ob času prijave in še dolgo za tem ni bilo mogoče uresničiti, niti ne njihovih prototipov, temveč čas, ko je veliko število novih strojev prestalo daljšo dobo obratovanja, v kateri je pokazalo za svoj čas zadovoljivo tehnično popolnost in gospodarsko upravičenost. Za plinske turbine je to čas ob koncu prve polovice tega stoletja. Ideja plinskih turbin je že stara (tehnični zgodovinarji velikih narodov se še niso zedinili, komu gre prvenstvo

zanje), vendar so tehnična sredstva za njeno uresničenje šele pred nedavnim toliko napredovala, da je mogla plinska turbina tudi gospodarsko doseči zelo razvite druge toplotne stroje na nekaterih področjih in povečati izbiro toplotnih pogonskih strojev. Močno gibalno za razvoj plinskih turbin so bili vojni interesi, vendar so rezultati enako pomembni tudi za civilne potrebe.

Tovarne, ki za raziskave žrtvujejo velike vsote, predvsem pa senzacij željno časopisje pogosto preveč poudarja dobre strani kake tehnične novosti, medtem ko o slabih molči. Kar zadeva plinske turbine, naj ta članek pripomore ustvariti pravo sliko o njihovih osnovah.

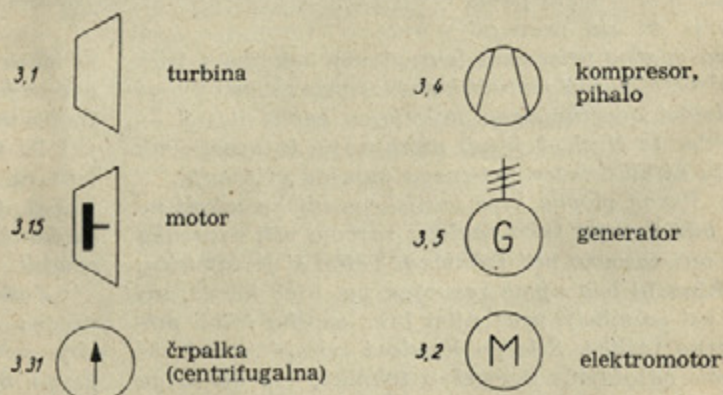
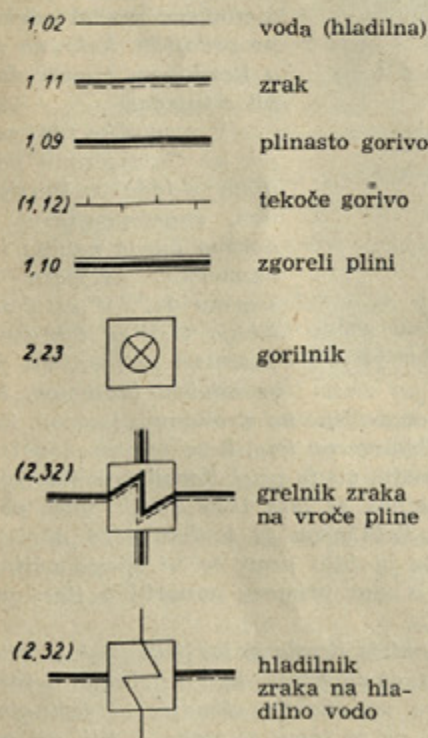
## Označbe veličin

|                         |                                     |
|-------------------------|-------------------------------------|
| $c_p$ [J/kg deg]        | spec. toplota zraka ali plina       |
| $d$ [kg/J]              | spec. poraba zraka ali plina        |
| $g$ [kg/kg]             | spec. poraba goriva (gorivo : zrak) |
| $H$ [J/kg]              | kurilna vrednost goriva             |
| $K$                     | količnik po enačbi (2c)             |
| $P$ [W]                 | moč                                 |
| $p$ [N/m <sup>2</sup> ] | tlak                                |
| $Q$ [J/kg]              | dovedena toplota                    |
| $q$ [kg/s]              | tok zraka ali plina                 |
| $T$ [°K]                | temperatura                         |
| $V$ [m <sup>3</sup> ]   | volumen                             |

|               |                                        |
|---------------|----------------------------------------|
| $\varepsilon$ | — tlačno razmerje po enačbi (1)        |
| $\eta$        | — izkoristek                           |
| $\kappa$      | — razmerje specifičnih toplot          |
| $\tau$        | — temperaturno razmerje po enačbi (11) |
| $\Phi$ [W]    | toplotni tok                           |

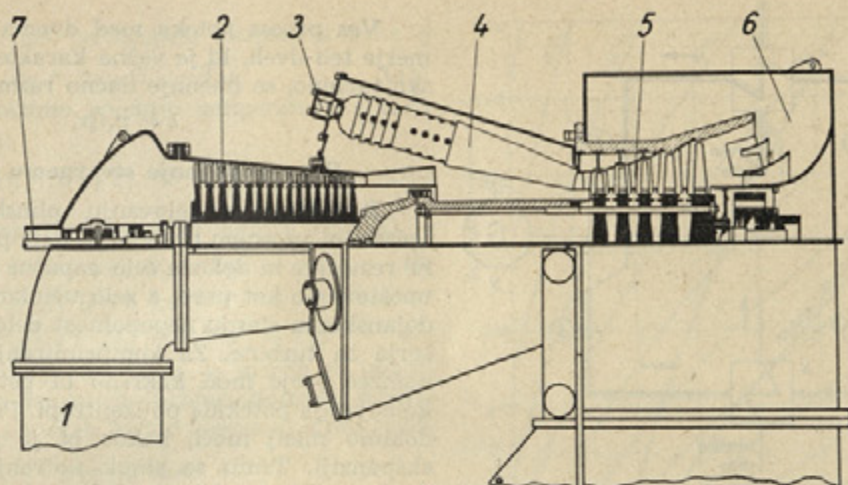
|          |                                |
|----------|--------------------------------|
| Indeksi: | $i$ — izentropski (adiabatski) |
|          | $k$ — kompresorja              |
|          | $n$ — notranji                 |
|          | $p$ — postrojenja              |
|          | $t$ — turbine                  |

Številke: od 0 do 5 — mesta procesa po sliki 7 in drugih.



Sl. 1. Nekateri znaki za sheme toplotnih postrojenj (po DIN 2481, izd. dec. 1954)





Sl. 2. Plinska turbina za 5000 kW na plinasto ali tekoče gorivo. Tlačno razmerje je 6, zgornja temperatura 730 °C. Izdelek podjetja Westinghouse Electric International Co., New York, ZDA

1...dovod zraka, 2...aksialni kompresor, 3...šoba za vbrizgavanje goriva, 4...gorilnik, 5...turbina, 6...izpuh, 7...gred gnanega stroja

### Splošni opis

Plinske turbine so sestavljene iz štirih osnovnih delov:

1. iz kompresorja, v katerem se sredstvo (zrak ali kak drug plin) komprimira;
2. iz grelnika ali gorilnika, v katerem se komprimirano sredstvo segreva;
3. iz turbine v ožjem pomenu besede, v kateri komprimirani vroči plini ekspandirajo in oddajajo energijo gredi stroja, ter
4. iz hladilnika, v katerem se plini ohlajajo do začetne temperature.

Razen naštetih štirih osnovnih delov imajo plinske turbine še razne pomožne naprave kakor:

1. naprave za zagon turbine (ročno, na akumuliran komprimirani zrak, z elektromotorjem, z motorjem z notranjim zgorevanjem), ker plinska turbina brez izdatne zunanje pomoči ne more steči;
2. naprave za dovod goriva in vžig (tlačilke pri tekočem gorivu, kompresorji pri plinastem gorivu, svečke, vodi za prenos plamena med gorilniki pri potisnikih);
3. naprave za mazanje ležajev;
4. regulacijske naprave (hitrostni, tlačni, temperaturni regulatorji);

5. zaščitne in varnostne naprave (hitrostno varovalo, da turbina ne uide, naprave za hlajenje močno obremenjenih delov turbine, mimovodni ventili, zaščitne pločvine in izolacija ter sita ali filtri pred ponori kompresorjev za zaščito osebja in stroja).

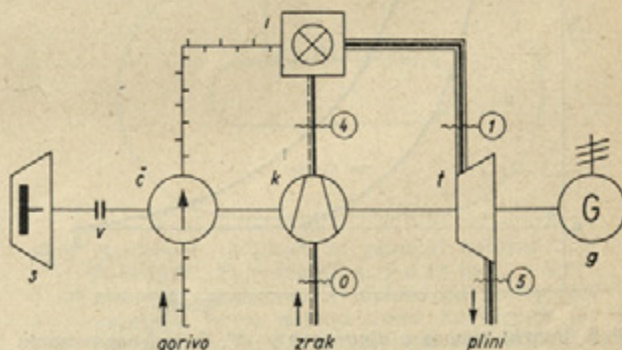
Vsi ti deli so izvedeni in med seboj povezani na zelo različne načine, pri čemer odločajo v glavnem namen stroja, njegova moč ter izkušnje izdelovalca. Kompresor je n. pr. lahko rotacijski (centrifugalni, aksialni, vijačni ipd.) ali baten (s pari prostih batov). Hladilnik n. pr. si kot strojni del prihranjemo v vseh tistih primerih, ko mo-

remo ohlajevanje sredstva prepuščati kar atmosferi, tako kakor to delamo pri parnih strojih na izpuh.

Glavni deli plinskih turbin in pomožne naprave so ali tesno združeni v en sam stroj ali pa je vsak del samostojen, vezan z drugim z gredno vezjo ali daljšim cevnim vodom. Nahajamo pa tudi vse močnejše vmesne izvedbe.

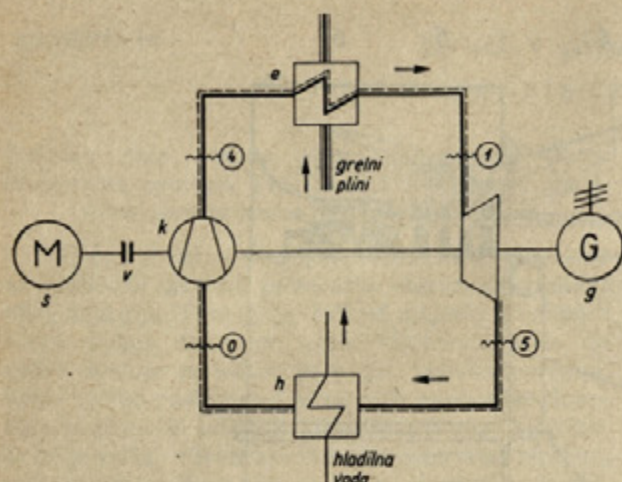
Ta čas najpomembnejša in najbolj razširjena vrst plinske turbine je pretočna plinska turbina na tekoče gorivo, sl. 2 in 3. Pri tej vrsti turbine doteka v kompresor atmosferski zrak. Tlačilka vbrizgava gorivo v gorilnik v komprimirani zrak. Gorivo v zraku zgori in ga segreje, ne da bi se pri tem spremenil tlak. Plini odhajajo po ekspanziji na prosto, vlogo hladilnika prevzame atmosfera. Vedno nov zrak teče skozi turbino in odtod tudi ime: pretočna turbina.

Druga važna skupina plinskih turbin so obtočne turbine, sl. 4, pri katerih kroži po turbini en in isti plin. Z vbrizgavanjem goriva naravnost v tok bi se plamen zaradi porabe kisika zadušil. Zato je treba pri obtočnih turbinah plin segrevati od zunaj s prehodom toplote skozi trdne stene. Tu je seveda hladilnik neogiben.



Sl. 3. Shema pretočnega postrojenja na tekoče gorivo, s...motor za zagon, v...sklopka za zagon. Znaki po sl. 1. Številke pomenijo stanje sredstva po sl. 7



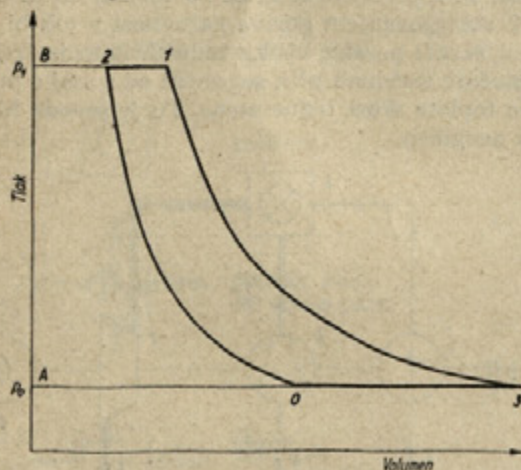


Sl. 4. Shema obtočnega postrojenja. s... motor za zagon, v... sklopka za zagon. Znaki po sl. 1. Številke pomenijo stanje sredstva po sl. 7

### Vzorni proces

Vse na zunaj tako raznolike izvedbe plinskih turbin pa delajo po enakem vzornem krožnem procesu. To je enakotlačni proces, kakršnega je predlagal Joule l. 1851 in po katerem delajo tudi parna turbinska postrojenja. Sestavljajo ga štiri spremembe stanja, od katerih se vsaka opravlja v svojem delu stroja. Če gremo s tokom sredstva skozi turbino, si sledijo spremembe stanja tako, sl. 5:

1. kompresor: izentropska kompresija od začetnega stanja  $p_0$ ,  $V_0$  in  $T_0$  do končnega stanja  $p_1$ ,  $V_1$  in  $T_1$ ;
2. grelnik: dovajanje toplote pri konstantnem tlaku  $p_1$ , pri čemer naraste volumen od  $V_1$  na  $V_2$  in temperatura od  $T_1$  na  $T_2$ ;
3. turbina: izentropska ekspanzija od stanja  $p_1$ ,  $V_1$  in  $T_1$  do stanja  $p_0$ ,  $V_0$  in  $T_0$ ;
4. hladilnik ali atmosfera: odvajanje toplote pri konstantnem tlaku  $p_0$ , pri čemer se zmanjša volumen od  $V_2$  na  $V_0$  in temperatura od  $T_2$  na  $T_0$ .



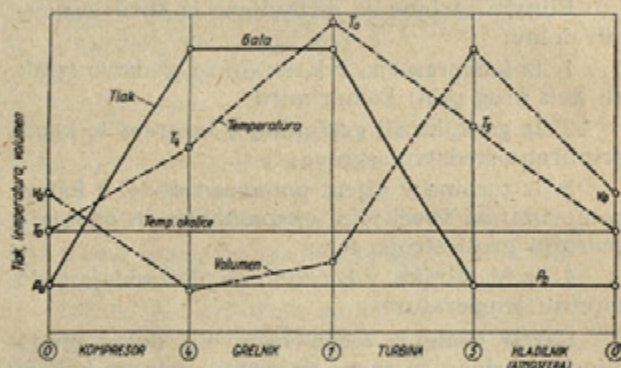
Sl. 5. Vzorni proces v diagramu  $p$ — $V$ . Delo kompresorja predstavlja ploščina 0-2-B-A-0, delo turbine ploščina 1-3-A-B-1, prosto delo pa ploščina 0-2-1-3-0. Merilo diagrama velja za tlačno razmerje 6 ter spodnjo temperaturo  $15^\circ\text{C}$  in zgornjo temperaturo  $600^\circ\text{C}$

Ves proces poteka med dvema tlakoma. Razmerje teh dveh, ki je važna karakteristika za plinsko turbino, se imenuje tlačno razmerje:

$$\varepsilon = p_1/p_0 \quad (1)$$

### Prvo približanje stvarnemu procesu

Raziskava o delovanju plinskih turbin po opisanem vzornem procesu bi dala premalo natančne rezultate in deloma celo napačne zaključke. Zato upoštevamo kot prvo, a zelo učinkovito približanje dejanskemu stanju nepopolnost delovanja kompresorja in turbine. Za komprimiranje potrebujemo namreč večjo moč, kakršno bi potrebovali, če bi kompresija potekala po izentropi. Pri ekspanziji pa dobimo manj moči, kakor bi jo pri izentropski ekspanziji. Temu so vzrok notranje izgube obeh strojev. Zaradi njih prihaja sredstvo iz kompresorja in iz turbine pri nespremenjenem končnem tlaku z višjo temperaturo, sl. 7. Vzemimo domnevno še, da je specifična toplota sredstva konstantna, tako da lahko uporabljamo splošno znane zakonitosti, ki veljajo za idealne pline (v resnici speci-



Sl. 6. Spreminjanje tlaka, temperature (absolutne) in spec. volumena vzdolž turbine. Merilo velja za veličine, kakršne so navedene na sliki 7

fična toplota za tehnične pline s temperaturo narašča; za zrak je n. pr. pri  $5^\circ\text{C}$   $1003\text{ J/kg deg}$ , pri  $615^\circ\text{C}$  pa  $1118\text{ J/kg deg}$ ). Po teh potrebujemo za izentropsko komprimiranje toka  $q$  moč:

$$P_{ki} = q c_p (T_2 - T_0) \quad (2a)$$

ali pa — če izločimo zgornjo temperaturo in uvedemo namesto nje tlačno razmerje:

$$P_{ki} = q c_p T_0 (K - 1) \quad (2b)$$

Pri tem pomeni  $K$  pogosto se ponavljajoči faktor:

$$K = \varepsilon^{(\gamma-1)/\gamma} \quad (2c)$$

Dejansko potrebujemo za komprimiranje neko večjo moč, ki jo lahko izračunamo po:

$$P_{kn} = q c_p (T_4 - T_0) \quad (3)$$

Razmerje obeh moči (po 2 in 3):

$$\eta_i = P_{ki}/P_{kn} = (T_2 - T_0)/(T_4 - T_0) \quad (4)$$

imenovano izentropski izkoristek kompresorja, je eno merilo za popolnost notranjega delovanja kompresorja. Moderni kompresorji dosežajo izkoristke do 0,85.



Turbina bi pri izentropski ekspanziji toka  $q$  dajala moč:

$$P_{ti} = q c_p (T_1 - T_2) \quad (5a)$$

oziroma, če izrazimo spodnjo temperaturo s tlačnim razmerjem:

$$P_{ti} = q c_p T_1 \left(1 - \frac{1}{K}\right) \quad (5b)$$

Dejansko pa daje turbina neko manjšo moč, ki je enaka:

$$P_{tn} = q c_p (T_1 - T_3) \quad (6)$$

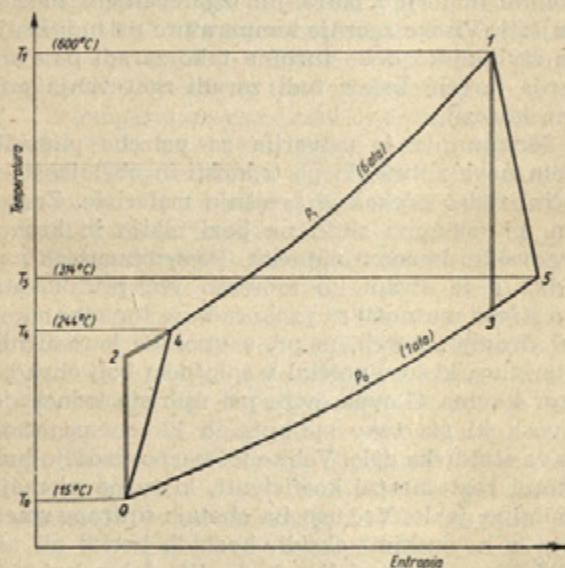
Razmerje obeh moči (po 5 in 6):

$$\eta_n = P_{tn}/P_{ti} = (T_1 - T_3)/(T_1 - T_2) \quad (7)$$

imenovano notranji izkoristek, je merilo za popolnost notranjega delovanja turbine. Notranji izkoristek modernih plinskih turbin dosega vrednost 0,90.

### Prosta moč

Turbina si mora sama gnati kompresor, tako da ostaja za pogon priključenega delovnega stroja na



Sl. 7. Enakotlačni proces, prikazan v diagramu  $T-s$  za zrak. Vzorni proces je 0-2-1-3-0, stvarni pa 0-4-1-5-0. Merilo velja za veličine, kakršne so navedene v oklepajih

razpolago samo razlika med močjo turbine in kompresorja. To razliko imenujemo prosta moč:

$$P_{pn} = P_{tn} - P_{kn} \quad (8a)$$

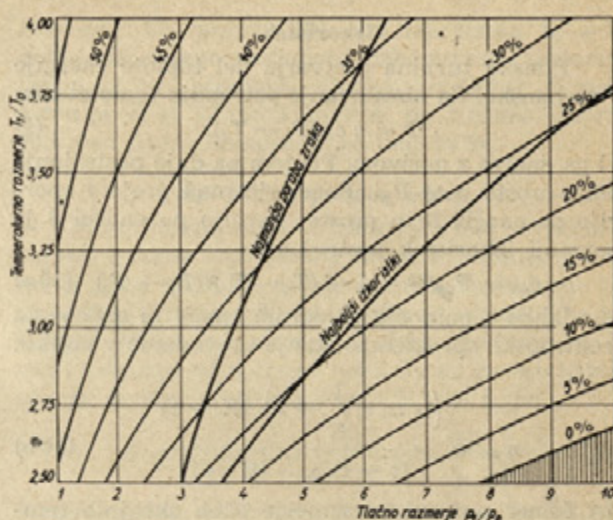
kar lahko pretvorimo z uporabo sprednjih enačb v obliko:

$$P_{pn} = q c_p [(T_1 - T_3) - (T_4 - T_0)] \quad (8b)$$

oziroma v:

$$P_{pn} = \left(1 - \frac{1}{\eta_n \eta_{ti}} \frac{T_0}{T_1} K\right) P_{ti} \quad (8c)$$

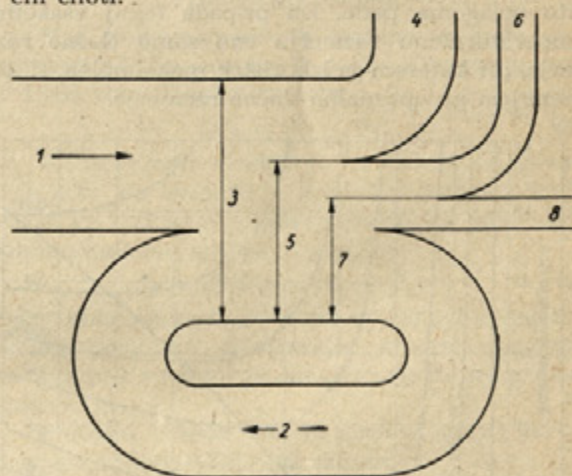
Izraz v oklepaju pove, kolikšen del notranje moči turbine je na razpolago za pogon priključenega delovnega stroja. Praktično zelo majhen, kajti večji del moči porabi kompresor. Pri temperaturah in kompresijskih razmerjih, ki dajejo dober izkoristek pri majhni porabi zraka, je proste komaj 20 do 30 % notranje moči turbine. Ostalih 80 do 70 % porabi kompresor. Tega pri parnih turbinah ne poznamo, kajti pri njih je skoraj vsa moč prosta. Znotraj plinskega postrojenja kroži tedaj 3- do



Sl. 8. Kolikšen del notranje moči turbine je proste za pogon priključenega stroja? Velja za izentropski izkoristek kompresorja 0,83 in za notranji izkoristek turbine 0,87

5-krat toliko energije, kolikor je je na razpolago za pogon priključenega stroja. Dejansko je prosta moč še manjša, ker pri enačbi 8 nismo upoštevali trenja v ležajih in pa pogona pomožnih naprav (črpalke za gorivo in olje ter regulatorja).

Največja plinska turbinska postrojenja dosežajo moč okrog 30 MW (imenska moč postrojenja je njegova prosta moč), parne pa 200 MW in več. Če upoštevamo veliko porabo kompresorja, nadalje to, da ima zrak manjšo specifično toploto kakor para (razmerje  $\approx 2:3$ ) in da so tlačni padci relativno majhni, smo zajeli tri okoliščine, ki večajo obsežnost plinskega postrojenja v primerjavi s parnim in zmanjšujejo moč, ki jo je mogoče doseči v eni enoti.



Sl. 9. Sankeyjev diagram za plinsko turbino z  $\varepsilon = 6$ ,  $T_0 = 15^\circ\text{C}$ ,  $T_1 = 600^\circ\text{C}$ ,  $\eta_i = 0,83$  in  $\eta_n = 0,87$   
1 — energija, dovedena s toploto od zunaj (100 %);  
2 — energija, ki jo nalaga zraku kompresor (61 %);  
3 — energija, ki jo dobiva turbina (161 %); od tega:  
4 — del energije, ki se ne da izkoristiti (79,5 %) in  
5 — del energije, ki bi se dala izkoristiti (107 %); 6 — izgube postrojenja (25,5 %); 7 — mehanska energija turbine (81,5 %) in 8 — prosta energija (20,5 %)



### Izkoristek

Plinska turbina pretvarja del toplote energije v mehansko. Za obratovanje potrebuje toplotni tok:

$$\Phi = q c_p (T_1 - T_4) \quad (9)$$

ki ga dobiva z gorivom. Pri tem pa daje postrojenje neko prosto moč  $P_{pn}$ . Razmerje med prejeto energijo po enačbi 9 in prosto energijo po enačbi 8 je notranji izkoristek postrojenja:

$$\eta_{pn} = P_{pn}/\Phi = 1 - (T_5 - T_6)/(T_1 - T_4) \quad (10a)$$

kar lahko s pomočjo sprednjih enačb in enačbe za izentropsko spremembo stanja prevedemo v obliko:

$$\eta_{pn} = \frac{\left( \tau \eta_n \eta_i \frac{1}{K} - 1 \right) (K - 1)}{(\tau - 1) \eta_i - (K - 1)} \quad (10b)$$

pri čemer pomeni  $\tau$  razmerje obeh skrajnih temperatur:

$$\tau = T_1/T_6 \quad (11)$$

V enačbi je sedem neodvisnih spremenljivk. Toda, če se odločimo za uporabo atmosferskega zraka ter kompresorja in turbine z določenim izkoristkom, ostane notranji izkoristek postrojenja odvisen samo še od tlačnega in temperaturnega razmerja:

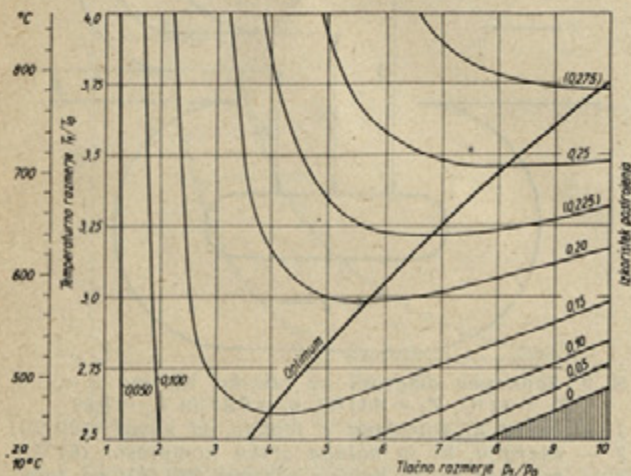
$$\eta_{pn} = f(\varepsilon, \tau) \quad (12)$$

kar lahko ponazorimo v diagramu s snopom krivulj, sl. 10.

Najvažnejši zaključki, ki jih daje pregled tako omejene enačbe za izkoristek so:

1. da je izkoristek odvisen od razmerja obeh skrajnih temperatur. N. pr. izkoristek med temperaturama  $-5^\circ\text{C}$  in  $650^\circ\text{C}$  je enak izkoristku med  $+15^\circ\text{C}$  in  $719^\circ\text{C}$ .

2. da izkoristek pri določenem stalnem temperaturnem razmerju z naraščajočim tlačnim razmerjem najprej hitro raste, doseže maksimum in nato polagoma pada. Da pripada tedaj vsakemu temperaturnemu razmerju eno samo tlačno razmerje, pri katerem je izkoristek maksimalen, sl. 10. Imenujem ga optimalno tlačno razmerje.



Sl. 10. Odvisnost izkoristka postrojenja od tlačnega in temperaturnega razmerja za  $\eta_i = 0,83$  in  $\eta_n = 0,87$ . Dodana temperaturna skala za zgornje temperature velja za primer, če je temperatura svežega zraka  $10^\circ\text{C}$

3. da so pri višjih temperaturnih razmerjih izkoristki v celoti boljši, optimalna tlačna razmerja pa večja.

4. da so za enaka povečanja temperaturnega razmerja izboljšanja izkoristkov vse manjša in manjša.

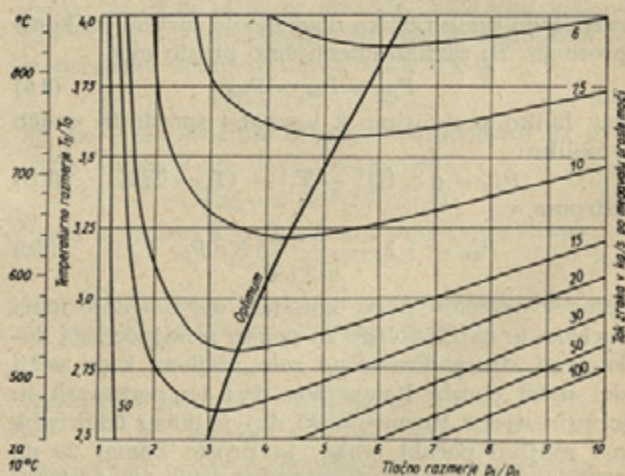
5. da se izkoristek okrog optimalne točke pri visokih temperaturnih razmerjih manj spreminja, če se spreminja kompresijski tlak, kakor pri nizkih.

Za dobro izkoriščanje goriva je tedaj potrebna čimvišja zgornja temperatura, če vzamemo domnevno, da določajo spodnjo temperaturo vremenski pogoji oziroma okolica. Z vidika vremenskih pogojev pa je ugodnejši mraz (zimski čas, severne pokrajine, velike višine) kakor vročina.

Zgornjo temperaturo omejuje trdnost materiala, ki se začne ravno pri temperaturah, ki omogočajo plinskim turbinam konkurenčni boj z dovršenimi motorji z notranjim zgorevanjem, močno manjšati. Visoke zgornje temperature pa tudi krajšajo življenjsko dobo turbine tako zaradi pojavov lezenja (creep) kakor tudi zaradi zgorevanja oziroma korozije.

Metalurgija je ustvarila za potrebe plinskih turbin nove zlitine, ki po trdnosti in obstojnosti v vročini daleč prekašajo prejšnje materiale. Znana je n. pr. skupina zlitin na bazi niklja in kroma s trgovskim imenom nimonik. Pomembnejšega napredka s te strani ne moremo več pričakovati. Zato iščejo možnosti za prekoračenje toplotne meje še v drugih smereh, n. pr. z uporabo keramičnih materialov, ki so v vročini v splošnem bolj obstojni kakor kovine. Glavna ovira pri njih sta trdnost in žilavost, ki sta tako majhni, da jih onemogočata celo za statorske dele. Velike težave povzročajo tudi toplotni razteznostni koeficienti, ki se ne ujemajo z onimi za jeklo. Več uspeha obetajo sintrane zmesi kovin s kovinskimi oksidi, karbidi, boridi ali nitridi\*. Ti novi materiali naj združijo dobre lastnosti

\* J. A. Ternisien, Superalliges et cermets. La Technique Moderne, 1957, str. 444.



Sl. 11. Odvisnost specifične porabe zraka od tlačnega in temperaturnega razmerja za  $\eta_i = 0,83$  in  $\eta_n = 0,87$ . Dodana temperaturna skala za zgornje temperature velja za primer, če je temperatura svežega zraka  $10^\circ\text{C}$



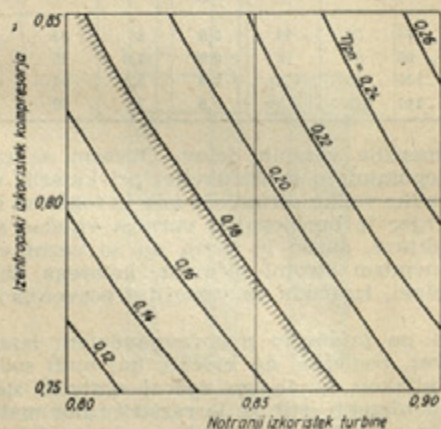
kovin in keramičnih snovi. Dopuščajo okrog 200 stopinj višje temperature kakor današnje najboljše zlitine, pri tem pa so okrog 25 % lažji od njih.

Razen z uporabo ustreznih materialov je mogoče zmanjšati škodo za turbino tudi s samimi konstrukcijskimi ukrepi, med katerimi je na prvem mestu hlajenje toplotno in trdnostno močno obremenjenih turbinskih delov, predvsem gonilnih lopatic. Vse številne dosedanje izvedbe hlajenja konstruktivno in tehnološko komplicirajo turbino in večajo dodatne izgube (na komprimiranem zraku, mehanske) v taki meri, da je njihova uporaba gospodarsko upravičena le v izjemnih primerih. V grobem računajo, da dela lahko turbina, če ima dobro hlajenje, s temperaturami, ki so 100 do 150 °C višje, kakršne bi bile brez hlajenja.

V povojnih gospodarskih razmerah se je ustalila zgornja meja (brez hlajenja) pri stacionarnih postrojenjih na 600 do 650 °C, pri potisnikih na 700 do 850 °C. Obratno sorazmerno z zgornjo temperaturo je trajanje pogona od enega do drugega popravila, ki je od sto tisoč ur do nekaj sto ur.

S temperaturo raste tudi optimalno tlačno razmerje. Toda tudi za najvišje, doslej uporabljene zgornje temperature je optimalno tlačno razmerje tako nizko, da ne pomenijo kompresorji zanj nobenega težkega tehničnega problema.

Posebno velik vpliv na izkoristek postrojenja imata izkoristek turbine in kompresorja, prvi v večji meri kakor drugi. Turbine so dosegle že v kratkem času razvoja dobre izkoristke, ker je ekspanzija stalnega toka tehnično mnogo preprostejša naloga kakor kompresija. Rotacijski kompresorji, ki niso dosti mlajši od turbin, pa so dosegli dandanašnjo stopnjo popolnosti (ki še vedno zaostaja za popolnostjo turbine) šele po obsežnih raziskavah v aerodinamičnih laboratorijih. Materiali, ki prenašajo visoke temperature, so bili prvi, dobri kompresorji pa drugi pogoj za konkurenčno sposobnost plinskih turbin. Tako turbine kakor tudi kompresorji so sedaj dosegli stopnjo popolnosti, nad katero ne bo šlo več daleč. S slike 12 je



Sl. 12. Odvisnost izkoristka postrojenja od izentropskega izkoristka kompresorja in od notranjega izkoristka turbine pri temperaturnem razmerju 10 °C/650 °C in tlačnem razmerju 6,5

razvidno, da morata biti oba izkoristka že zelo dobra, da dosega postrojenje izkoristek, kakršnega imajo n. pr. bencinski motorji (~ 18 %). V primeru po sliki 12 mora imeti n. pr. turbina izkoristek nad 84 %, kompresor pa nad 80 %.

### Specifična poraba zraka

Razen proste moči in izkoristka nas pri plinski turbini zanima tudi poraba zraka, t. j. koliko zraka mora skozi stroj za določeno moč. Ta količina je namreč glavno merilo za obsežnost stroja, ker so hitrosti zraka v posameznih delih postrojenja le malo odvisne od njegove moči. Izraz za specifično porabo zraka, izveden iz enačb 5, 6 in 8, je:

$$d = 1 / \left[ c_p (K - 1) \left( \frac{T_1}{K} \eta_a - \frac{T_0}{\eta_a} \right) \right] \quad (13)$$

Razen veličin, od katerih je bil odvisen že izkoristek, nahajamo tu še specifično toploto. Obe skrajni temperaturi pa se ne pojavljata v razmerju, temveč samostojno.

Za povečanje nazornosti enačbe napravimo tako kakor pri enačbi za izkoristek: za nekatere veličine, pri katerih nimamo dosti izbire, vstavimo številčne vrednosti. Slika 11, ki jo dobimo po tej poti, je zelo podobna sliki 10, tako da so zaključki o specifični porabi zraka podobni zaključkom o izkoristku. Tudi tu se pokaže, da obstajajo optimalni parametri (tlačno in temperaturno razmerje), pri tem pa so tlačna razmerja, pri katerih je poraba zraka najmanjša, nižja kakor tlačna razmerja, pri katerih so izkoristki najboljši. Na sliki 8 sta narisani obe krivulji: za najmanjšo porabo zraka in za najboljše izkoristke. Konstrukterji izbirajo osnovne parametre na vmesnem področju, kakor pač bolje ustreza namenu posamezne turbine.

### Dovajanje toplote

Med kompresorjem in turbino je treba zrak segrevati od temperature  $T_1$  na  $T_2$ . Kilogramu zraka je treba zato dovajati toploto:

$$Q = c_p (T_2 - T_1) \quad (14)$$

Pri turbinah z odprtim procesom segrevamo zrak tako, da uvajamo v gorilniku gorivo v zračni tok in ga puščamo v njem zgoreti. Za prvo oceno dobimo količino goriva po enačbi:

$$g = Q/H = c_p (T_2 - T_1)/H \quad (15)$$

Točno količino goriva dobimo na osnovi energetske bilance gorilnika, upoštevajoč kinetične energije ter entalpije vseh tokov, ohlajevanje in nepopolnost zgorevanja.

Pretočni plinski turbini ustreza vsako gorivo, ki izpolnjuje naslednji dve zahtevi:

1. da se pri gorenju v celoti vplinja,
2. da zgoreli plini ne vsebujejo sestavin, ki povzročajo korozijo ali se izločajo na stenah.

Zaradi prve zahteve so izločena vsa trdna goriva, ki jih je mogoče uporabljati le, če jih prej vplinimo v plinskih generatorjih (posebno tlačnih) ali pod zemljo. Za to pa so potrebna dodatna postrojenja, ki po eni strani večajo investicijske stro-



ške, hkrati pa s svojimi neizogibnimi izgubami še zmanjšujejo že tako slab izkoristek postrojenja. Na primer: če je izkoristek plinskega generatorja 80 %, turbine (postrojenja) 17 % in električnega generatorja 95 %, je izkoristek od trdnega goriva do električne energije:  $0,8 \cdot 0,17 \cdot 0,95 = 0,13$ , t. j. 13 %. Toliko pa se da dosežati tudi s parnimi lokomobilmami.

Po razmerah se uporabljajo ali plinasta goriva — n. pr. na naftnih poljih naravni plin, v železarnah plin iz plavžev, v vele mestih plin iz čistilnih naprav za odpadne vode — ali tekoča goriva. Slednja so predvsem v rabi pri letalih, ladjah, lokomotivah in avtomobilih. Izmed tekočih goriv lahko uporabljamo vse od lahkega bencina do najtežjih olj; o izbiri odločajo samo gospodarski razlogi. Goriva ne potrebujejo nobenih posebnih dodatkov, kakor je to n. pr. pri bencinskih motorjih. Ista turbina teče lahko na več sorodnih tekočih goriv. S preprosto zamenjavo gorilnika je mogoče hitro preiti od plinastega goriva na tekoče ali obratno. Izjema so potisniki, pri katerih so zaradi težkih okoliščin obratovanja postavljene ožje meje, vendar gorivo (večinoma je v rabi petrolej) tudi pri teh ne potrebuje posebnih obravnav.

Količina goriva, ki je potrebna, da se zrak segreje na zahtevano temperaturo, je tako majhna (okrog 8 do 12 g/kg zraka), da nastala zmes sploh ne bi gorela. Hkrati so hitrosti zraka v turbini večje kakor je hitrost širjenja plamena, tako da se plamen ne bi mogel vzdržati. Pri večini konstrukcij sta ta dva problema hkrati rešena z uvedbo notranjega plašča v gorilniku. Skozi rege ali luknje

plašča prihaja vanj le toliko zraka, kolikor je potrebno, da se tvori dobro gorljiva zmes in je plamen v zavetju. Ostali zrak teče okrog plašča, ga hladi in se na koncu pomeša s tokom iz plašča, tako da nastaja tok enakomerne temperature in sestava.

### Zaključek

Vkljub velikemu napredku so ostale pglavitne slabe strani enostavnih pretočnih plinskih turbin še vedno slab izkoristek, majhna prosta moč in to, da zanje ni mogoče uporabljati trdnih goriv. V raznih primerih pa so važnejše njihove dobre strani, in sicer: stroj je preprost in nima delov, ki bi se obrabljali, teče mirno in ima enakomeren vrtilni moment, lahko se naglo zaganja in takoj polno obremenjuje, potrebuje malo osebja, ker se vse postrojenje upravlja in nadzoruje z enega mesta, ne potrebuje nobene vode, pač pa samo malo olja za mazanje, teče lahko na različna, tudi nekvalitetna goriva, zavzema malo prostora, je lahek in poceni, grozi le majhna nevarnost eksplozije in požara, ker imajo goriva visoko vrelišče in vnetišče ter so tlaki nizki.

Za prometna sredstva (posebno letala) so važnejše našete dobre strani od slabih. Energetika terja boljše izkoristke, ki se dajo dosežati le na račun enostavnosti konstrukcije, tako n. pr. z regeneracijo, s hlajenjem med kompresijo, z gretjem med ekspanzijo. To pa je tako obsežna snov, da jo je treba posebej obravnavati.

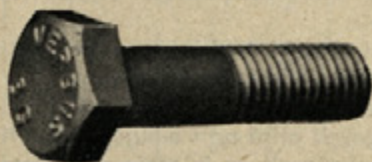
Avtor: prof. ing. Boris Cernigoj, Oddelek za strojništvo fakultete za elektrotehniko in strojništvo v Ljubljani

DK 621.882.1.01

## Izračun vijanih zvez

MILAN MURŠIČ

Nagli razvoj tehnike je pustil že daleč za seboj dobo, ko je bil vezni vijak še malo pomemben strojni element, izdelan izključno iz običajnega jekla (St 38.13) s kovanjem v razžarjenem stanju (črni vijaki) ali stružen iz vlečenih šestorobnih palic (svetli vijaki). Prehod na serijsko proizvodnjo terja popolnejše računske osnove za določanje nosilnosti in varnosti vijanih zvez; približne ocenitve, ki so bile še zadovoljive v individualni proizvodnji, tu ne morejo več vzdržati strogega kriterija o zahtevah po zanesljivosti in ekonomičnosti. Razvoj lahke gradnje, ki teče vzporedno s serijsko proizvodnjo, pa terja tudi boljše kvalitete vijakov, ki naj imajo veliko nosilnost pri majhnih dimenzijah oziroma teži in tudi majhne potrebne pri-



Sl. 1. Kvalitetni vijak trdnostnega razreda 6 G z vtisnjenim znakom kvalitete in trdke. Trdka Bauer & Schaurte že od leta 1908 proizvaja vijake s postopkom hladnega oblikovanja brez rezanja in je utrla pot kvalitetnim vijakom v Evropo. Ta čas izdeluje nad 2000 vrst standardnih ter specialnih vijakov in matic

Tabela 1

Trdnostni razredi za kvalitete vijake po standardu DIN 67 in njihovi trdnostni podatki.

| Znak trdnostnega razr. | $\sigma_m$ kp/mm <sup>2</sup> | $\sigma_v$ kp/mm <sup>2</sup> | $\xi$ % | $\frac{\sigma_v}{\sigma_m}$ | $\sigma_a$ dop | $0,7 \sigma_v$ | $\frac{1}{f_z} \frac{F_p}{F_z}$ |
|------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------|-----------------------------|----------------|----------------|---------------------------------|
| 6 G                    | 60 ... 70                     | 54                            | 14      | 0,9                         | 3              | 38             | 4,2                             |
| 8 G                    | 80 ... 90                     | 64                            | 12      | 0,8                         | 3,5            | 45             | 4,4                             |
| 10 K                   | 100 ... 120                   | 90                            | 8       | 0,9                         | 5,5            | 63             | 4,5                             |
| 12 K                   | 120 ... 140                   | 108                           | 8       | 0,9                         | 7              | 76             | 4,7                             |

ključne dimenzije vezanih delov. Obenem se razvijajo in izpopolnjujejo konstrukcije, pri katerih vijak prenaša izredno velike utripajoče sile in toplotne spremembe in kjer je brezpogojna varnost vijane zveze osnovna zahteva. Jasno je torej, da so vezni vijaki postali pomemben strojni element, katerega oblikovanju, izdelavi, izračunu in vgraditvi posvečamo vso pozornost.

Preden pa pričnemo z obravnavanjem izračuna vijanih zvez, pogledimo na kratko, kaj nudi sodobna industrija vijakov za dosego zgoraj naštetih zahtev. V zadnjih petdesetih letih se je razširil izbor materialov za vijake na boljše in trdnjše kvalitete (tabela 1). Za preoblikovanje teh materialov v tako imenovane kvalitetne vijake (sl. 1) pa se je uveljavil nov tehnološki postopek (sl. 2), ki je prevzel v svetu že skoraj celotno področje pri izdelavi navadnih vijakov v di-