

NOVICA VASILJEVIĆ

# PARNE TURBINE

MAŠINSKI FAKULTET  
Beograd, 1990.

Dr Novica Vasiljević

P A R N E    T U R B I N E

UDK 621.165=861

III izdanje

Recenzenti

Dragutin Stojanović, redovni profesor  
Dr Živorad Stojanović, redovni profesor

Izdavač

Mašinski fakultet  
Univerziteta u Beogradu  
Beograd, 27. marta 80

Štampanje odobrila

Komisija za izdavačku delatnost  
Mašinskog fakulteta u Beogradu  
01.12.1989.

Glavni i odgovorni urednik  
Prof. dr Martin Bogner

Za izdavača

Milena Lukić, dipl. filozof

Tiraž: 500 primeraka

Štampa: Zavod za grafičku tehniku  
Tehnološko-metalurškog fakulteta  
Beograd, Karnedžijeva 4

ISBN 86-7083-163-5

---

Preštampavanje ili umnožavanje nije dozvoljeno

## P r e d g o v o r

Parne turbine zauzimaju veoma značajno mesto u energetici, a prema naučnim prognozama zadržaće vodeće mesto u proizvodnji električne energije i u budućnosti. Ovakav značaj parnih turbina uslovio je njihov ubrzan razvoj baziran na dostignućima fundamentalnih nauka. Razvoj parnih turbina karakteriše: povećana pouzdanost u eksploataciji, sve veći stepen korisnosti, porast jedinične snage, unifikacija i veoma visok nivo automatskog upravljanja.

Ovim udžbenikom nisu obuhvaćeni mehanički problemi i konstrukcija parnih turbina, kao ni procesi u sistemima opreme za regulisanje.

Autor zahvaljuje recensentima dipl. inž. Dragutinu Stojanoviću, redovnom profesoru Mašinskog fakulteta i dr Živoradu Stojanoviću, dipl. inž., redovnom profesoru Mašinskog fakulteta, koji su rukopis pregledali i stavili veoma korisne primedbe.

Prilikom komponovanja sadržaja pojedinih poglavlja ovog udžbenika autor je nastojao da unese sve što je dosad ostvareno u nastavi PARNIH TURBINA na Mašinskom fakultetu u Beogradu. U ovom smislu autor je imao veliku pomoć profesora Dragutina Stojanovića, čije je savete za unapredjenje nastave uvek rado prihvatao.

U pojedinim poglavljima, kao na primer "Rad turbine pri promenljivom režimu", izložena materija prema navedenoj literaturi, biće od velike koristi i studentima poslediplomskih studija.

Problem stvaranja savremenih parnih turbina ne može se posmatrati izolovano od parnog turbopostrojenja, kao ni od namene i uslova eksploatacije. Dosad ostvarena saradnja sa ELEKTROPRIVREDOM SR Srbije, koju autor realizuje radeći u Grupi za TOPLOTNE TURBINE Mašinskog fakulteta, veoma je koristila autoru u sagledavanju uslova rada parnih turbina, izbora dovoljno racionalnog i ekonomičnog termodinamičkog ciklusa i načina obezbeđenja visokog stepena korisnosti parne turbine i svih pomoćnih uređaja. Iz ovih razloga autor posebno zahvaljuje rukovodstvu TERMOELEKTRANE "Nikola Tesla" - A u Obrenovcu, koje je omogućilo saradnju realizovanu pod rukovodstvom profesora Dragutina Stojanovića.

Autor zahvaljuje drugarici Leposavi Radojković i drugu Dobrosavu Tomiću za tehničku obradu knjige.

U ovom, drugom izdanju, ispravljene su sve uočene daktilografske greške.

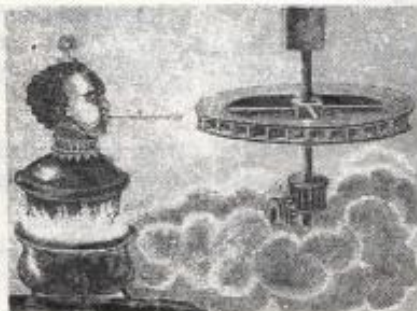
Beograd

Januar 1987. godine

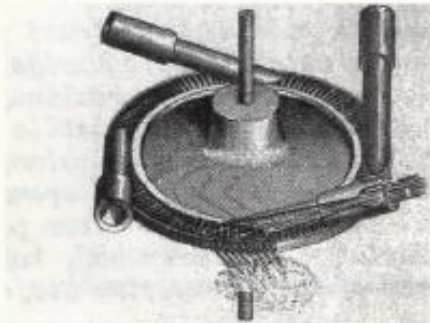
Autor



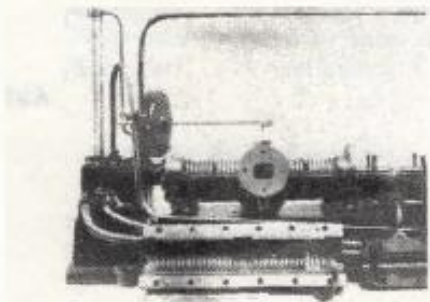
*Lopta Herona Aleksandrijskog,  
120 godina pre nove ere.*



*Turbina italijanskog apotekara  
Djovana de Branke, 1629. godine.*



*Akciona turbina švedskog inženjera  
Gustava de Laval, 1883. godine.*



*Reakciona turbina engleza Čarlsa  
Parsonsa, 1884. godine.*

## S A D R Ž A J

1. UVOD .....	1
1.1. Osnovni pojmovi .....	1
1.2. Istorijski razvoj parnih turbina.....	2
1.3. Definicije i nazivi .....	3
1.4. Princip rada i osnovni elementi parnih turbina .....	3
1.5. Klasifikacija parnih turbina .....	4
1.6. Primena parnih turbina u termoelektranama .....	11
1.7. Primena parnih turbina za pogon brodova .....	14
2. TERMODINAMIČKE OSNOVE .....	15
2.1. Termodinamičke osnove parnog bloka .....	15
2.1.1. Kontrolne granice .....	15
2.1.2. Osnovni termodinamički parametri parnog bloka .....	17
2.1.3. Stepeni korisnosti turbine i turboagregata .....	18
2.1.4. Glavni termodinamički parametri parnog bloka i turbopostrojenja .....	27
2.1.5. Bilansiranje parnog bloka i turbopostrojenja po prvom zakonu termodinamike .....	32
2.1.6. Bilansiranje parnog bloka i turbopostrojenja po drugom zakonu termodinamike .....	38
2.2. Poboljšanje parnog bloka .....	48
2.2.1. Uticaj osnovnih termodinamičkih parametara na stepen korisnosti parnog bloka .....	48
2.3. Politropski stepen korisnosti .....	59
3. STRUJANJE PARE U PARNIM TURBINAMA .....	63
3.1. Osnovne jednačine strujanja stišljivog fluida .....	63
3.2. Gasodinamičke veličine stanja - totalna temperatura i totalni pritisak .....	73
3.3. Gasodinamička izentropa, presek kanala i promena stanja .....	76
3.4. Fizička razlika između nekompresibilnih, dozvučnih i nadzvučnih strujanja .....	86
3.5. Gubici energije pri stvarnom strujanju u rešetkama .....	95
3.6. Rešetke turbina .....	101

3.7. Glavni gasodinamički parametri rešetke .....	109
3.7.1. Stepen korisnosti rešetke .....	110
3.7.2. Skretljivost rešetke i koeficijent opterećenja .....	125
3.7.3. Koeficijent protoka .....	131
3.7.4. Gasodinamičke karakteristike rešetki .....	132
3.8. Strujanje vlažne pare .....	133
4. STUPANJ TURBINE .....	138
4.1. Aksijalni elementarni stupanj .....	139
4.1.1. Ojlerova jednačina .....	144
4.1.2. Stepen korisnosti na obimu .....	147
4.1.2.1. Stepen korisnosti na obimu opšteg stupnja ....	149
4.1.2.2. Stepen korisnosti na obimu aksijalnog akcionog elementarnog stupnja .....	151
4.1.2.3. Stepen korisnosti na obimu aksijalnog reakcionog elementarnog stupnja .....	156
4.1.3. Značilce za turbinske stupnjeve .....	159
4.2. Stupnjevi turbina sa podstupnjevima brzine (Aksijalni akcioni stupnjevi tipa Kertis) .....	162
4.3. Radijalni i radijalno-aksijalni stupnjevi .....	169
4.4. Unutrašnji stepen korisnosti .....	172
4.4.1. Gubitak zbog trenja .....	174
4.4.2. Unutrašnji gubici zbog parcijalnog punjenja stupnja....	177
4.4.3. Gubitak zbog procepa .....	180
4.4.4. Gubitak zbog vlažnosti pare .....	185
5. PROSTORNO STRUJANJE U PARNIM TURBINAMA .....	191
5.1. Aproksimacije pri rešavanju prostornog strujanja .....	193
5.2. Jednačina radijalne ravnoteže .....	194
5.3. Opšte rešenje uprošćene jednačine radijalne ravnoteže za izlaz iz pretkola .....	197
5.3.1. Rešenje jednačine radijalne ravnoteže za $\alpha_j = \text{const.}$ ....	200
5.3.2. Rešenje jednačine radijalne ravnoteže za vihorno strujanje .....	204
5.3.3. Rešenje jednačine radijalne ravnoteže za strujanje konstantnom strujnom gustinom duž radijusa .....	208
5.3.4. Uporedjenje raznih rešenja strujanja .....	208
6. VIŠESTUPNE PARNE TURBINE .....	210
6.1. Broj oklopa i višestrukost oklopa turbine .....	212
6.2. Broj obrta i vratila turbine .....	217
6.3. Izbor načina regulisanja turbine i tipa stupnjeva.....	221
6.4. Približna ocena unutrašnjeg stepena korisnosti turbine i određivanje broja stupnjeva .....	230

6.5. Odredjivanje granične snage po jednoj paralelnoj struji pare turbine niskog pritiska i izbor dimenzija poslednjeg stupnja .....	236
6.6. Poslednji stupanj turbine niskog pritiska .....	242
6.7. Manevarske i dinamičke karakteristike parnih turbina .....	246
7. RAD TURBINE PRI PROMENLJIVOM REŽIMU .....	253
7.1. Stepennost reaktivnosti stupnja turbine i protok pare kroz stupanj .....	253
7.1.1. Rešetke za dozvučno strujanje .....	254
7.1.2. Rešetke za nadzvučno strujanje .....	258
7.1.3. Promena stepena reaktivnosti stupnja .....	260
7.1.3.1. Uticaj promene značice izentropskog rada $\bar{h}_{sS}$ na stepennost reaktivnosti $r$ .....	261
7.1.3.2. Uticaj promene odnosa pritiska $\epsilon_{sT}$ na stepennost reaktivnosti $r$ stupnja .....	265
7.1.3.3. Uticaj Rejnoldsovog broja na stepennost reaktivnosti $r$ stupnja .....	266
7.1.4. Promena protoka pare kroz stupanj .....	267
7.1.4.1. Uticaj promene značice izentropskog rada $\bar{h}_{sS}$ na protok pare pri $\epsilon_{sT} = \text{const}$ .....	268
7.1.4.2. Uticaj odnosa pritiska $\epsilon_{sT} = p_2/p_{\text{otot}}$ na protok pare .....	269
7.2. Stepennost korisnosti stupnja pri promeni režima rada .....	271
7.2.1. Uticaj značice izentropskog rada $\bar{h}_{sS}$ na unutrašnji stepennost korisnosti $\eta_i$ stupnja .....	272
7.2.2. Uticaj odnosa pritiska $\epsilon_{sT}$ na unutrašnji stepennost korisnosti $\eta_i$ stupnja .....	275
7.2.3. Uticaj Rejnoldsovog broja na unutrašnji stepennost korisnosti $\eta_i$ stupnja .....	275
7.3. Poslednji stupnjevi kondenzacionih turbina pri promeni zapreminskog protoka .....	276
7.4. Promena pritiska i toplotnih padova u stupnjevima turbine pri promenljivom režimu rada .....	283
TURBINE ZA KOMBINOVANU PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE, TOPLOTE I TEHNOLOŠKE PARE .....	289
8.1. Kombinovana proizvodnja električne energije, toplote i tehnološke pare .....	289
8.2. Tipovi parnih turbina za kombinovanu proizvodnju električne energije, toplote i tehnološke pare .....	294
8.3. Glavni termodinamički parametri parnog bloka i turbopostrojenja za kombinovanu proizvodnju energije .....	300
8.4. Dijagrami režima .....	307

8,4.1.	Dijagram režima za protivpritisne turbine .....	308
8.4.2.	Dijagram režima za kondenzacione turbine sa regulisanim oduzimanjima pare .....	309
8.5.	Maksimalna električna snaga turbina za TE-TO .....	322
8.6.	Oduzimanja pare za daljinsko grejanje i pripremu sanitarne tople vode .....	324
9.	PARNE TURBINE ZA NUKLEARNE ELEKTRANE .....	336
9.1.	Rezerve goriva u svetu .....	336
9.2.	Karakteristični problemi za turbopostrojenja i parne turbine nuklearnih elektrana .....	337
9.2.1.	Biološka zaštita .....	338
9.2.2.	Parametri sveže pare .....	338
9.2.3.	Separacija vlage i dogrevanje pare .....	340
9.2.4.	Snaga i broj obrta turbine .....	345
9.2.5.	Uticaj vlažnosti pare na konstrukciju parnih turbina...	348
9.2.6.	Ostali karakteristični problemi .....	350
9.3.	Parne turbine za kombinovanu proizvodnju energije u nuklearnim elektranama - toplanama .....	358
10.	REGULISANJE PARNIH TURBINA I TURBOPOSTROJENJA .....	360
10.1.	Termodinamički problemi regulisanja parnih turbina .....	361
10.2.1.	Mlazničko regulisanje .....	363
10.2.2.	Regulisanje prigušivanjem .....	367
10.2.3.	Šeme regulacijskih kola za mlazničko regulisanje i regulisanje prigušivanjem .....	369
10.2.4.	Kombinovani način mlazničkog regulisanja i regulisanja prigušivanjem .....	371
10.2.5.	Regulisanje kliznim pritiskom .....	371
10.2.6.	Regulisanje modifikovanim kliznim pritiskom .....	372
10.3.	Uticaj načina regulisanja na specifičnu potrošnju toplote ,...	373
10.4.	Statičko ponašanje regulacijskih kola parnih turbina za termoelektrane .....	375
10.5.	Regulisanje parnih turbina za termoelektrane - toplane.....	377
10.6.	Regulisanje parnih turbopostrojenja .....	379
	L i t e r a t u r a .....	381



## 1. UVOD

Od početka dvadesetog veka parna turbina počela je zauzimati osnovne pozicije u proizvodnji električne energije u termoelektranama. Danas već nema konkurenta u termoelektranama veće snage i više od 80 % električne energije proizvodi se u parnim turboagregatima. Uvodjenjem nuklearne energije parna turbina još više je učvrstila svoje pozicije. Sada se već zna da će parna turbina biti primenjivana i u novoj eri energetike na bazi magnetno-dinamičkih generatora i termonuklearne energije. Iz ovih razloga parni blokovi u budućnosti zauzimaće jedno od centralnih mesta u energetici i zato njihov razvoj i usavršavanje biće sve značajniji za svaku zemlju.

Vodeće mesto parnih blokova u energetici nas obavezuje da pažljivo prognoziramo njihov razvoj, razvijamo proizvodnu bazu i planiramo naučna istraživanja na ovom polju radi daljeg opšteg progressa. Samo naučna prognoza može da da odgovor da li su opravdana velika ulaganja za razvoj parnih turbina.

### 1.1. OSNOVNI POJMOVI

Parne turbine, gasne turbine i turbokompresori su toplotne turbomašine. Naziv toplotne dobile su po tome što se u njima vrše toplotne promene, a turbo zato što im je glavno kretanje obrtno kretanje jednog ili više radnih kola (turbo-obrtanje). Ove mašine često zovemo i strujne zato što kroz njih u kontinualnom toku struji radni fluid.

Zato što u parnim turbinama struji para radnog fluida (najčešće vodena para) i vrše se toplotne promene, proučavanje parnih turbina zasniva se na zajedničkim zakonima mehanike fluida i termodinamike. Ovi zajednički zakoni čine osnovu mehanike strujanja kompresibilnih fluida ili dinamike gasova.