



UNIVERZITET U NIŠU
MAŠINSKI FAKULTET U NIŠU



Dragoljub Živković

TERMOENERGETSKA POSTROJENJA



Niš, 2020.

UNIVERZITET U NIŠU
MAŠINSKI FAKULTET

Dragoljub Živković

TERMOENERGETSKA POSTROJENJA



Niš, 2020.

Naslov publikacije: Termoenergetska postrojenja.
Autor: dr Dragoljub Živković, redovni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nišu.
Recenzenti: dr Dragan Kalaba, redovni profesor Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Prištini sa sedištem u Kosovskoj Mitrovici.
dr Mića Vukić, redovni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nišu.
Izdavač: Mašinski fakultet Univerziteta u Nišu,
ul. Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš.
Štampa: „GALEB”, Niš.
Tiraž: 100 primeraka.

Na prednjoj strani korica prikazana je
Termoelektrana „Nikola Tesla - B”, snage 2×620 MW.

Na zadnjoj strani korica prikazan je turbomlazni motor firme
Rolls-Royce „Trent 7000”, ugrađen u avion Airbus A330.

SADRŽAJ

PREDGOVOR	4
OZNAKE	1
1. UVOD	4
1.1. Definicija i podela termoenergetskih postrojenja	4
1.2. Istorijski razvoj termoenergetskih postrojenja	6
1.3. Strateški prioriteti razvoja termoenergetskih postrojenja u Republici Srbiji	11
2. TERMODINAMIČKE OSNOVE PARNOG BLOKA	13
2.1. Osnovni termodinamički parametri parnog bloka	13
2.2. Stepeni korisnosti parne turbine i turboagregata	15
2.3. Glavni termodinamički parametri parnog bloka i parnog turbopostrojenja	21
2.4. Bilansiranje parnog bloka i parnog turbopostrojenja po prvom zakonu termodinamike	25
2.5. Bilansiranje parnog bloka i parnog turbopostrojenja po drugom zakonu termodinamike	29
2.5.1. Radne sposobnosti radnog tela, goriva i razmenjene toplote	29
2.5.2. Proračun gubitaka radne sposobnosti u pojednim delovima parnog bloka	33
2.5.3. Bilans parnog bloka po drugom zakonu termodinamike	37
2.6. Termodinamička poboljšanja parnog bloka	38
2.7. Perspektive daljeg usavršavanja i razvoja parnog bloka	43
3. TERMODINAMIČKE OSNOVE GASNOG BLOKA	47
3.1. Definicija stepena korisnosti kompresora	47
3.2. Osnovni i glavni termodinamički parametri gasnog bloka zatvorenog tipa	49
3.2.1. Određivanje glavnih termodinamičkih parametara gasnog bloka i turbopostrojenja zatvorenog tipa	50
3.3. Određivanje glavnih termodinamičkih parametara gasnog bloka otvorenog tipa	54
3.4. Upoređenje parnog i gasnog bloka na osnovu bilansa po prvom i drugom zakonu termodinamike	57
3.5. Termodinamička poboljšanja gasnog bloka	58
3.6. Politropski stepen korisnosti	62
4. KOTLOVSKA POSTROJENJA	67
4.1. Definicija osnovnih pojmova	67
4.2. Parni kotlovi	68
4.2.1. Podela parnih kotlova	68
4.3. Princip rada parnog kotla	72
4.4. Konstrukcije parnih kotlova	76
4.4.1. Parni kotlovi na čvrsto gorivo	76
4.4.2. Protočni kotlovi	77
4.4.3. Kotlovi na tečno i gasovito gorivo – Blok kotlovi	78
4.4.4. Specijalni kotlovi – Kotlovi utilizatori	80
4.5. Materijalni i toplotni bilans parnog kotla	80
4.5.1. Materijalni bilans kotla	81
4.5.2. Toplotni bilans kotla	81
4.5.3. Stepeni korisnosti	82
4.5.4. Potrošnja goriva	83

4.5.5. Analiza kotlovskih gubitaka	83
5. PARNA TURBOPOSTROJENJA	95
5.1. Sistem regenerativnog zagrevanja napojne vode	95
5.2. Stepen korisnosti turbopostrojenja	104
5.3. Kondenzaciono postrojenje	107
5.3.1. Prenos toplote pri kondenzaciji pare na čvrstim površinama	109
5.3.2. Postrojenje površinskog kondenzatora	112
6. TERMOENERGETSKA POSTROJENJA SA GASNOM TURBINOM	117
6.1. Princip rada, sastavni delovi i termodinamički koeficijent korisnog dejstva	117
6.2. Joule-ov ciklus sa rekuperacijom	123
6.3. Joule-ov ciklus sa dogrevanjem	124
6.4. Joule-ov ciklus sa međuhlađenjem i dogrevanjem	126
6.5. Kombinacija Joule-ovog i Clausius-Rankine-ovog ciklusa	126
6.6. Joule-ov ciklus sa ubrizgavanjem pare	129
6.7. Reaktivni motori sa gasnom turbinom	130
6.8. Komore za sagorevanje	134
6.8.1. Elementi sklopa komore za sagorevanje	134
6.8.2. Strujanje kroz komoru za sagorevanje	138
6.8.3. Sagorevanje u komori	140
7. POMOĆNI SISTEMI U TERMOENERGETSKIM POSTROJENJIMA	145
7.1. Sistemi za snabdevanje termoenergetskih postrojenja gorivom	145
7.1.1. Sistem snabdevanja ugljem	145
7.1.2. Sistem snabdevanja tečnim gorivom	148
7.1.3. Sistem snabdevanja gasovitim gorivom	149
7.1.4. Sistem pomoćnog goriva	151
7.2. Sistem za uklanjanje šljake i pepela	151
7.3. Sistem za snabdevanje termoenergetskih postrojenja vodom	153
7.3.1. potrošnja vode	153
7.3.2. Sistemi vodosnabdevanja	155
7.3.3. Vodeni bilans termoelektrana	164
7.4. Sistem za hemijsku pripremu vode	166
7.5. Sistemi za zaštitu životne sredine	172
7.5.1. Smanjenje sadržaja sumpornih oksida u dimnim gasovima	172
7.5.2. Smanjenje sadržaja azotnih oksida u dimnim gasovima	174
8. KOMBINOVANA PROIZVODNJA ELEKTRIČNE I TOPLOTNE ENERGIJE	179
8.1. Termoelektrane toplane (TE-TO)	179
8.2. Potrošnja pare i toplote u toplifikacionim termoelektranama	183
8.2.1. Postrojenje sa protivpritisnom turbinom	183
8.2.2. Postrojenje sa kondenzacionom turbinom sa regulisanim oduzimanjem pare	185
8.3. Poređenje toplotne ekonomičnosti toplifikacione termoelektrane i razdvojenog postrojenja	187
8.3.1. Poređenje potrošnje pare	188
8.3.2. Poređenje potrošnje toplote	189

8.4.	Kombinovana proizvodnja toplotne i električne energije u termoelektranama toplanama sa parnim i gasnim turbinama	190
8.5.	Industrijske termoelektrane	194
8.5.1.	Sistemi snabdevanja toplotom iz industrijskih termoelektrana	195
8.5.2.	Proračun toplotnih šema industrijskih termoelektrana	197
9.	ELEKTRO-OPREMA TERMOELEKTRANA	199
9.1.	Jednopolna šema elektropostrojenja termoelektrane	199
9.2.	Transformatori	201
9.3.	Generator električne energije	202
9.3.1.	Konstrukcija turbogeneratorskih namotaja	203
9.3.2.	Hlađenje turbogeneratorskih namotaja	208
9.3.3.	Radna karakteristika generatora	211
9.3.4.	Napajanje pobudnog namotaja	212
9.4.	Sopstvena potrošnja termoelektrane - Asinhroni motori	214
9.4.1.	Konstrukcija asinhronog elektromotora	215
9.4.2.	Radna karakteristika asinhronog elektromotora	219
9.4.3.	Promena brzine obrtanja rotora elektromotora	220
10.	NUKLEARNO ENERGETSKA POSTROJENJA	223
10.1.	Razvoj nuklearne energetike	225
10.2.	Nuklearni procesi	227
10.2.1.	atomska jezgra	227
10.2.2.	Neutroni i neutronske reakcije	228
10.2.3.	Usporavanje neutrona	229
10.3.	Nuklearni reaktor	229
10.3.1.	Nuklearno gorivo	231
10.3.2.	Gorivni elementi i sklopovi	232
10.3.3.	Reaktorski hladioci	234
10.4.	Nuklearni reaktori za energetska postrojenja	235
10.4.1.	Ključajući reaktor (BWR)	236
10.4.2.	Reaktor hlađen vodom pod pritiskom (PWR)	238
10.4.3.	Nuklearne elektrane sa gasom hlađenim reaktorima	240
10.4.4.	Nuklearne elektrane sa brzim reaktorima hlađenim tečnim metalom	242
10.4.5.	Osnovne eksploatacione karakteristike nuklearnih elektrana	243
10.4.6.	Nuklearne elektrane male snage	245
10.5.	Uticaj nuklearnih elektrana na životnu sredinu	250
11.	EKSPLOATACIJA TERMOENERGETSKIH POSTROJENJA	253
11.1.	Automatsko regulisanje parnih blokova	253
11.1.1.	Regulisanje parnih blokova u režimu konstantnog pritiska	254
11.1.2.	Regulisanje parnih blokova u režimu kliznog pritiska	257
11.2.	Startovanje postrojenja	260
11.3.	Režim rada pod opterećenjem	264
11.4.	Obustava rada postrojenja	265
11.5.	Izvođenje blokova u rezervu	265
11.6.	Kriterijumi za ocenu pouzdanosti, pogonske spremnosti i ekonomičnosti rada	266
11.7.	Moguće havarije i poremećaji u radu	267
11.7.1.	Parni kotlovi	267
11.7.2.	Parne turbine	269

12. PRORAČUN TROŠKOVA PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE	271
12.1. Opšta razmatranja	271
12.2. Energetsko-tehničke karakteristike termoelektrana	272
12.3. Karakteristike troškova termoelektrana	276
12.3.1. Investicioni troškovi	277
12.3.2. Eksploatacioni troškovi	281
12.3.3. Proračun proizvodnje termoelektrana	284
LITERATURA	287
PRILOG	290
PRILOG 1 - GORIVA I SAGOREVANJE	291
P1.1. Goriva	291
P1.2. Toplotna moć goriva	292
P1.3. Stehiometrijske jednačine sagorevanja	294
P1.4. Teorijska količina kiseonika za potpuno sagorevanje	294
P1.5. Minimalno potrebna količina vazduha za potpuno sagorevanje	295
P1.6. Stvarna količina vazduha za sagorevanje	295
P1.7. Produkti sagorevanja	296
PRILOG 2 - PROCESI U KOMORI ZA SAGOREVANJE (KS)	304
P2.1. Tipovi sagorevanja	304
P2.2. Neophodni procesi u komori za sagorevanje	306
P2.3. Stabilizacija sagorevanja	307
PRILOG 3 - PRORAČUN OTVORENOG CIKLUSA GASNOG BLOKA PO METODI TRAUPEL-A [42, 7]	311
PRILOG 4 - PRIMER PRORAČUNA PRINCIPIJELNE TOPLOTNE ŠEME INDUSTRIJSKE ELEKTRANE SNAGE 50 MW [1]	317
PRILOG 5 - PRORAČUN DIMNJAKA [1]	325

PREDGOVOR

Knjiga „Termoenergetska postrojenja” napisana je prema programu predmeta „Termoenergetska postrojenja”, koji se izučava na IV godini studija na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Nišu. Zbog toga, knjiga je prvenstveno namenjena studentima Mašinskog fakulteta u Nišu, koji slušaju nastavu iz ovog predmeta. Knjiga „**Termoenergetska postrojenja**” može koristiti i studentima drugih tehničkih fakulteta koji u programu svojih studija imaju istoimeni predmet. Detaljan opis procesa u termoelektranama, termoelektranama-toplanama, toplanama i industrijskim energanama može biti od koristi i inženjerima koji se bave projektovanjem i organizacijom proizvodnje u ovim veoma složenim energetske postrojenjima.

Veliku zahvalnost autor upućuje recenzentima ove knjige dr Draganu Kalabi, redovnom profesoru Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Prištini, sa sedištem u Kosovskoj Mitrovici i dr Mići Vukiću, redovnom profesoru Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nišu, koji su rukopis veoma pažljivo pročitali i dali korisne primedbe i sugestije.

Autor će biti veoma zahvalan i svim čitaocima ove knjige, posebno studentima i stručnjacima iz prakse, koji budu uputili svoje primedbe i sugestije u cilju poboljšanja njenog sadržaja.

U Nišu,

Marta, 2020. godine

Autor



Dr Dragoljub Živković, redovni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nišu, rođen je 26.03.1955. godine u Leskovcu. Osnovnu školu i gimnaziju na prirodno-matematičkom smeru završio je u Leskovcu sa odličnim uspehom. Oba puta je nagrađen diplomama „Vuk Stefanović-Karadžić“.

Na Mašinskom fakultetu u Beogradu, na smeru za temoenergetiku, diplomirao je 15.02.1980.godine odbranom diplomskog rada pod nazivom „Automatsko puštanje u rad parnog turbopostrojenja“. Magistarski rad pod nazivom „Dinamičko ponašanje parne turbine pri dejstvu zaštitnih uređaja“ odbranio je 1985. godine. Doktorsku disertaciju pod nazivom „Izučavanje dinamičkog ponašanja parnih turbina pri nestacionarnim režimima rada“ odbranio je 1993. godine.

U okviru izrade doktorske disertacije boravio je školske 1985/

86. godine šest meseci na Mašinskom fakultetu Tehničkog Univerziteta u Pragu radi specijalizacije iz oblasti analize nestacionarnih procesa i višefaznih strujanja u termoenergetskim postrojenjima.

Dr Dragoljub Živković je na Mašinskom fakultetu u Nišu izabran za docenta 1993. godine, vanrednog profesora 1998. godine i redovnog profesora 2003. godine. Držao je nastavu iz većeg broja predmeta na osnovnim, master i doktorskim studijama iz oblasti termoenergetike, termotehnike i procesne tehnike. Bio je mentor većeg broja diplomskih i master radova, kao i tri magistrature i četiri doktorata. Dva urađena doktorata su 2019. i 2021. godine proglašeni za najbolje urađene doktorske disertacije u Srbiji iz oblasti mašinskog inženjerstva.

Profesor dr Dragoljub Živković je objavio 9 univerzitetskih udžbenika i zbirki zadataka, preko 200 radova u domaćim i međunarodnim časopisima, kao i na domaćim i međunarodnim naučnim konferencijama. Učestvovao je u realizaciji većeg broja nacionalnih i međunarodnih naučnih i inovacionih projekata.

Za izuzetan doprinos razvoju Mašinskog fakulteta i Univerziteta u Nišu nagrađen je Poveljom Mašinskog fakulteta 2021. godine i Srebrnim znakom Univerziteta u Nišu 2018. godine. .