



УНИВЕРЗИТЕТ У ПРИШТИНИ

Драгољуб Живковић
Драгица Миленковић
Шефик Бајмак

ТОПЛОТНЕ ТУРБОМАШИНЕ



Приштина, 1997.



УНИВЕРЗИТЕТ У ПРИШТИНИ

ТОПЛОТНЕ ТУРБОМАШИНЕ

*Др Драгољуб Живковић, доцент на
Машинском факултету у Нишу*

*Др Драгица Миленковић, ванредни професор на
Машинском факултету у Нишу*

*Др Шефик Бајмак, доцент на
Машинском факултету у Приштини*

Приштина, 1997.

Доц. др ДРАГОЉУБ ЖИВКОВИЋ
Проф. др ДРАГИЦА МИЛЕНКОВИЋ
Доц. др ШЕФИК БАЈМАК
ТОПЛОТНЕ ТУРБОМАШИНЕ

Рецензенти:

Проф. др Новица Васиљевић, Машински факултет у Београду
Проф. др Слободан Лаковић, Машински факултет у Нишу

Издавач:

Универзитет у Приштини

За издавача:

Проф. др Радивоје Паповић

Уредник:

Проф. др Миодраг Јаблановић

Техничка припрема:

Мр Предраг Рашковић, дипл. маш. инж.

Штампа:

"Пергамент", Приштина

Тираж:

300 примерака

ISBN 86-81029-77-0

Одобрено за штампу одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета у Приштини бр. 300 од 17. 06. 1997. год.

САДРЖАЈ

1. УВОД	7
1.1. ОСНОВНИ ПОЈМОВИ	7
1.2. ДЕФИНИЦИЈЕ И НАЗИВИ	9
1.3. ИСТОРИЈСКИ РАЗВОЈ ТОПЛОТНИХ ТУРБИНА	9
1.4. ПРИНЦИП РАДА И ОСНОВНИ ЕЛЕМЕНТИ ТОПЛОТНИХ ТУРБОМАШИНА	12
1.5. КЛАСИФИКАЦИЈА ПАРНИХ ТУРБИНА	12
1.6. КЛАСИФИКАЦИЈА ТУРБОКОМПРЕСОРА	17
1.7. ПРИМЕНА ПАРНИХ И ГАСНИХ ТУРБИНА	20
1.7.1. Примена парних турбина у термоелектранама	20
1.7.2. Примена гасних турбина у термоелектранама	22
1.8. ПРИМЕНА ТУРБОКОМПРЕСОРА	23
<i>1 ДЕО: СТРУЈНО-ТЕРМОДИНАМИЧКЕ ОСНОВЕ РАДА ТОПЛОТНИХ ТУРБОМАШИНА</i>	25
2. СТРУЈНЕ ОСНОВЕ РАДА ТОПЛОТНИХ ТУРБОМАШИНА	27
2.1. ЈЕДНОДИМЕНЗИЈСКА СТАЦИОНАРНА КОМПРЕСИБИЛНА СТРУЈАЊА	27
2.1.1. Једначина стања	27
2.1.2. Основни закони одржања (конзервације)	28
2.2. ДЕФИНИЦИЈА СПЕЦИЈАЛНИХ ГАСДИНАМИЧКИХ ПРОЦЕСА НА ОСНОВУ ЗАКОНА О ОДРЖАЊУ ЕНЕРГИЈЕ	32
2.3. ГАСДИНАМИЧКЕ ВЕЛИЧИНЕ СТАЊА - ТОТАЛНИ ПРИТИСАК И ТОТАЛНА ТЕМПЕРАТУРА	34
3. ГАСДИНАМИЧКИ ПРОЦЕСИ У ТОПЛОТНИМ ТУРБОМАШИНАМА	36
3.1. УДАРНИ ТАЛАСИ	36
3.1.1. Нормални ударни таласи	37
3.1.2. Коси ударни таласи	40
3.2. АДИЈАБАТСКО СТРУЈАЊЕ СА ТРЕЊЕМ У ЦЕВИ КОНСТАНТНОГ ПРЕСЕКА - FANNO ПРОЦЕС	41

3.3. ДИЈАБАТСКО СТРУЈАЊЕ БЕЗ ТРЕЊА У ЦЕВИ КОНСТАНТНОГ ПРесеКА - RAYLEIGH-ОВ ПРОЦЕС	42
3.4. КОСИ ЕКСПАНЗИОНИ ТАЛАСИ PRANDTL-MEYER-ОВО СТРУЈАЊЕ	44
4. РЕШЕТКЕ ТОПЛОТНИХ ТУРБОМАШИНА	48
4.1. ГЕОМЕТРИЈСКИ ПАРАМЕТРИ ПРОФИЛА И РАВНЕ РЕШЕТКЕ ..	48
4.2. РАДНИ ПАРАМЕТРИ РЕШЕТКЕ	51
4.3. ГЛАВНИ ГАСОДИНАМИЧКИ ПАРАМЕТРИ РЕШЕТКЕ	51
4.3.1. Степен корисности решетки	52
4.3.2. Утицај релативног корака ($t \setminus s$) на губитке у равној решетки	53
4.3.3. Утицај Re - броја на губитке у равној решетки	55
4.3.4. Утицај Ma - броја на губитке у равној решетки	56
4.3.5. Утицај нападног угла на губитке у равној решетки	57
4.3.6. Губитак у решетки због дејства граничних зидова због крајева	58
4.3.7. Скретљивост решетки и коефицијент оптерећења	58
4.3.8. Коефицијент протока	59
4.3.9. Гасодинамичке карактеристике решетки	59
4.3.10. Дефиниција средње брзине за решетку	60
4.3.11. Дефиниција аеродинамичких коефицијената за профил у решетки	63
5. ЈЕДНОДИМЕНЗИЈСКА ТЕОРИЈА СТУПЊЕВА ТОПЛОТНИХ ТУРБИНА	64
5.1. ОПИС СТРУЈАЊА У ЕЛЕМЕНТАРНОМ СТУПЊУ ТОПЛОТНИХ ТУРБИНА	65
5.1.1. Ојлерова једначина за турбине	68
5.1.2. Степен реактивности	70
5.1.3. Степен корисности на обиму	70
5.2. СТЕПЕН КОРИСНОСТИ НА ОБИМУ АКСИЈАЛНОГ АКЦИОНОГ ЕЛЕМЕНТАРНОГ СТУПЊА	72
5.3. СТЕПЕН КОРИСНОСТИ НА ОБИМУ АКСИЈАЛНОГ РЕАКЦИОНОГ СТУПЊА ТИПА ПАРСОНС	76
5.4. СТЕПЕН КОРИСНОСТИ НА ОБИМУ ОПШТЕГ СТУПЊА	79
5.5. ЗНАЧИЦЕ ЗА ТУРБИНСКЕ СТУПЊЕВЕ	80
6. УНУТРАШЊИ СТЕПЕН КОРИСНОСТИ ЕЛЕМЕНТАРНОГ СТУПЊА ТУРБИНЕ	83
6.1. ГУБИТАК ЗБОГ ТРЕЊА	84
6.2. УНУТРАШЊИ ГУБИЦИ ЗБОГ ПАРЦИЈАЛНОГ ПУЊЕЊА СТУПЊА	87

6.3. ГУБИТАК ЗБОГ ПРОЦЕПА	89
6.4. ГУБИТАК ЗБОГ ВЛАЖНОСТИ ПАРЕ	95
7. ЈЕДНОДИМЕНЗИЈСКА ТЕОРИЈА КОМПРЕСОРСКИХ СТУПЊЕВА	98
7.1. ОПИС СТРУЈАЊА У КОМПРЕСОРСКОМ СТУПЊУ	100
7.2. ЗНАЧИЦЕ ЕЛЕМЕНТАРНИХ СТУПЊЕВА КОМПРЕСОРА И БЕЗДИМЕНЗИЈСКИ ТРОУГЛОВИ БРЗИНА	102
7.3. ПРОМЕНЕ ЗНАЧИЦЕ РАДА НА ОБИМУ СА ПРОМЕНОМ ЗНАЧИЦЕ ПРОТОКА	104
7.4. ПРОМЕНЕ КИНЕМАТСКОГ СТЕПЕНА РЕАКТИВНОСТИ СА ПРОМЕНОМ ЗНАЧИЦЕ ПРОТОКА	105
8. РАВАНСКА СТРУЈАЊА КРОЗ РЕШЕТКЕ	106
8.1. ДВОДИМЕНЗИЈСКА ТЕОРИЈА	106
8.2. МЕТОДА КОНФОРМНОГ ПРЕСЛИКАВАЊА	107
8.3. МЕТОДА СИНГУЛАРИТЕТА	109
8.4. МЕТОДА КРИВИНЕ СТРУЈНИЦЕ	110
8.5. МЕТОДА КОНАЧНИХ РАЗЛИКА	111
8.6. МЕТОДА КОНАЧНИХ ЕЛЕМЕНАТА	112
8.7. ПРИМЕНА ТЕОРИЈЕ УЗГОНСКИХ ПОВРШИНА НА РАВНУ РЕШЕТКУ	113
8.7.1. Дефиниција силе узгона за један профил у решетки	113
8.7.2. Дефиниција аеродинамичких коефицијената за профил у решетки	115
8.7.3. Пораст притиска у ступњу	116
8.7.4. Степен корисности нормалног ступња аксијалног компресора дефинисан односом притисака	118
9. ПРОСТОРНО СТРУЈАЊЕ У ТОПЛОТНИМ ТУРБОМАШИНАМА	120
9.1. ЈЕДНАЧИНА РАДИЈАЛНЕ РАВНОТЕЖЕ	121
9.2. ОПШТЕ РЕШЕЊЕ УПРОШЋЕНЕ ЈЕДНАЧИНЕ РАДИЈАЛНЕ РАВНОТЕЖЕ ЗА ИЗЛАЗ ИЗ ПРЕТКОЛА	124
9.2.1. Решење упрошћене једначине радијалне равнотеже за $\alpha_1 = \text{const.}$	125
9.2.2. Решење упрошћене једначине радијалне равнотеже за вихорно струјање	127
10. СЛИЧНОСТ СТРУЈАЊА У ТОПЛОТНИМ ТУРБОМАШИНАМА	130
10.1. ГЕОМЕТРИЈСКА СЛИЧНОСТ СТРУЈАЊА	131
10.2. КИНЕМАТСКА СЛИЧНОСТ СТРУЈАЊА	132
10.3. ТЕХНИЧКИ УСЛОВИ СЛИЧНОСТИ СТРУЈАЊА	133

10.4. ГАСОДИНАМИЧКА СЛИЧНОСТ СТРУЈАЊА	135
10.5. ДИНАМИЧКА СЛИЧНОСТ СТРУЈАЊА	136
10.6. СЛИЧНОСТ СТРУЈАЊА У ВИШЕСТУПНИМ ТУРБОМАШИНАМА	137
10.7. ПОНАШАЊЕ ТОПЛОТНИХ ТУРБОМАШИНА ПРИ СЛИЧНОМ СТРУЈАЊУ	139
11. ПРОМЕНЉИВИ РЕЖИМИ РАДА ТОПЛОТНИХ ТУРБИНА	141
11.1. ПРОТОЧНА КАРАКТЕРИСТИКА ТОПЛОТНИХ ТУРБИНА	142
11.2. ПРОМЕНА ПРОТОКА КРОЗ СТУПАЊ	143
11.3. ПРОМЕНА СТЕПЕНА РЕАКТИВНОСТИ СТУПЊА	145
11.4. ПРОМЕНА СТЕПЕНА КОРИСНОСТИ СТУПЊА	145
11.4.1. Утицај значајце изентропског рада \bar{h}_{SS} на унутрашњи степен корисности ступња η_i	147
11.4.1. Утицај односа притиска ϵ_{st} на унутрашњи степен корисности ступња η_i	150
11.4.1. Утицај Рејнолдсовог броја на унутрашњи степен корисности ступња η_i	150
 II ДЕО: ОСНОВИ ТЕОРИЈЕ КОНСТРУКЦИЈА, РЕГУЛИСАЊА И РЕЖИМИ РАДА ТОПЛОТНИХ ТУРБОМАШИНА	 151
12. ВИШЕСТУПНЕ ПАРНЕ ТУРБИНЕ	153
12.1. БРОЈ ОКЛОПА И ВИШЕСТРУКОСТ ОКЛОПА ТУРБИНЕ	154
12.2. БРОЈ ОБРТАЈА И ВРАТИЛА ТУРБИНЕ	156
12.3. ИЗБОР НАЧИНА РЕГУЛИСАЊА ТУРБИНЕ И ТИПА СТУПЊЕВА	157
12.4. ИЗБОР ТИПА СТУПЊЕВА	157
12.5. ПРИБЛИЖНА ОЦЕНА УНУТРАШЊЕГ СТЕПЕНА КОРИСНОСТИ ТУРБИНЕ И ОДРЕЂИВАЊЕ БРОЈА СТУПЊЕВА	158
12.6. ОДРЕЂИВАЊЕ БРОЈА СТУПЊЕВА	160
12.7. ОДРЕЂИВАЊЕ ГРАНИЧНЕ СНАГЕ ПО ЈЕДНОЈ ПАРАЛЕЛНОЈ СТРУЈИ ПАРЕ ТУРБИНЕ НИСКОГ ПРИТИСКА И ИЗБОР ДИМЕНЗИЈА ПОСЛЕДЊЕГ СТУПЊА	161
13. ВИШЕСТУПНИ КОМПРЕСОРИ	166
13.1. ЗАВИСНОСТ a_w ОД $\bar{\eta}$ И (p_2/p_1)	169
14. РОТОРИ ТОПЛОТНИХ ТУРБОМАШИНА	173
14.1. ОПШТЕ НАПОМЕНЕ	173

14.2. ДИСКОВНИ РОТОРИ	174
14.3. ДОБОШАСТИ РОТОРИ	177
14.4. МАТЕРИЈАЛИ ЗА ИЗРАДУ РОТОРА	178
14.5. ПРОРАЧУН ВРАТИЛА НА ЧВРСТОЋУ	178
14.6. ОДРЕЂИВАЊЕ КРИТИЧНОГ БРОЈА ОБРТАЈА ВИШЕСТЕПЕНЕ ТУРБИНЕ	179
14.7. СПОЈНИЦЕ	182
15. ЛЕЖАЈИ ТОПЛОТНИХ ТУРБОМАШИНА	184
15.1. РАДИЈАЛНИ ЛЕЖАЈИ	184
15.2. АКСИЈАЛНИ ЛЕЖАЈИ	187
15.2.1. Конструкција и подмазивање аксијалних лежаја	189
16. ЛОПАТИЦЕ ТОПЛОТНИХ ТУРБОМАШИНА	191
16.1. ОПШТЕ НАПОМЕНЕ	191
16.2. ИЗРАДА ЛОПАТИЦА	192
16.3. УЧВРШЋЕЊЕ ЛОПАТИЦА	193
16.4. СИЛЕ КОЈЕ ДЕЈСТВУЈУ НА ЛОПАТИЦЕ И ДОПУШТЕНА НАПРЕЗАЊА	194
16.4.1. Прорачун лопатице на истезање због дејства цетрифугалних сила	195
16.5. ПРОРАЧУН ЛОПАТИЦЕ НА САВИЈАЊЕ	195
16.6. ВИБРАЦИЈЕ ЛОПАТИЦА	197
16.7. МАТЕРИЈАЛИ ЗА ИЗРАДУ ТУРБИНСКИХ ЛОПАТИЦА	202
17. ОКЛОПИ ТОПЛОТНИХ ТУРБОМАШИНА	203
17.1. ОПШТЕ НАПОМЕНЕ	203
17.2. ОПТЕРЕЋЕЊЕ ОКЛОПА, ДОПУШТЕНА НАПРЕЗАЊА И ПРИМЕЊЕНИ МАТЕРИЈАЛИ	206
17.3. МАТЕРИЈАЛИ ДЕЛОВА ОКЛОПА	206
18. ПАРНЕ ТУРБИНЕ ЗА КОМБИНОВАНУ ПРОИЗВОДЊУ ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ, ТОПЛОТЕ И ТЕХНОЛОШКЕ ПАРЕ (ПАРНЕ ТУРБИНЕ ЗА ТЕ-ТО)	209
18.1. КОМБИНОВАНА ПРОИЗВОДЊА ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ, ТОПЛОТЕ И ТЕХНОЛОШКЕ ПАРЕ	209
18.2. ТИПОВИ ПАРНИХ ТУРБИНА ЗА КОМБИНОВАНУ ПРОИ- ЗВОДЊУ ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ, ТОПЛОТЕ И ТЕХНОЛОШКЕ ПАРЕ	214
18.3. ГЛАВНИ ТЕРМОДИНАМИЧКИ ПАРАМЕТРИ ТУРБОПОСТРО- ЈЕЊА ЗА КОМБИНОВАНУ ПРОИЗВОДЊУ ЕНЕРГИЈЕ	215
18.4. ДИЈАГРАМИ РЕЖИМА РАДА ПАРНИХ ТУРБИНА ЗА КОМБИНОВАНУ ПРОИЗВОДЊУ ЕНЕРГИЈЕ	218
18.4.1. Дијаграм режима за противпритисне турбине	219

18.4.2. Дијаграм режима за кондензационе турбине са регулисаним одузимањима паре	220
18.4.3. Максимална електрична снага турбина за ТЕ-ТО	226
18.4.4. Одузимања паре за даљинско грејање и припрему санитарне топле воде	227
19. АУТОМАТСКО РЕГУЛИСАЊЕ ПАРНИХ ТУРБИНА	229
19.1. ТЕРМОДИНАМИЧКИ ОСНОВИ РЕГУЛИСАЊА ПАРНИХ ТУРБИНА	230
19.2. МЛАЗНИЧКО РЕГУЛИСАЊЕ	231
19.3. РЕГУЛИСАЊЕ ПРИГУШИВАЊЕМ	234
19.4. РЕГУЛИСАЊЕ ПАРНОГ БЛОКА У РЕЖИМУ КОНСТАНТНОГ ПРИТИСКА ПАРЕ	235
19.5. РЕГУЛИСАЊЕ КЛИЗНИМ ПРИТИСКОМ	236
19.6. РЕГУЛИСАЊЕ МОДИФИКОВАНИМ КЛИЗНИМ ПРИТИСКОМ ..	238
19.7. УТИЦАЈ НАЧИНА РЕГУЛИСАЊА НА СПЕЦИФИЧНУ ПОТРОШЊУ ТОПЛОТЕ	238
19.8. СТАТИКА РЕГУЛИСАЊА ПАРНИХ ТУРБИНА	239
19.8.1. Директно регулисање - Регулисање парних турбина без сервопојачавача	239
19.8.2. Сервомоторско регулисање парних турбина	240
19.8.3. Статичка карактеристика регулисања парних турбина за термоелектране	242
19.8.4. Дејство механизма управљања при паралелном раду турбоагрегата	243
19.8.5. Регулисање парних турбина за комбиновану производњу електричне и топлотне енергије	244
19.9. СИСТЕМ АУТОМАТСКЕ ЗАШТИТЕ ПАРНЕ ТУРБИНЕ	246
20. КАРАКТЕРИСТИКЕ ВИШЕСТУПНИХ КОМПРЕСОРА	248
20.1. ОПШТЕ НАПОМЕНЕ	248
20.2. О СПРЕЧАВАЊУ ПОЈАВЕ ПУМПАЊА У ТУРБОКОМПРЕСОРИМА	253
20.3. АНАЛИТИЧКИ ИЗРАЗИ КОЈИ ДАЈУ УСЛОВЕ ЗА РАД КОМПРЕСОРА У СТАБИЛНОМ ПОДРУЧЈУ	255
21. АУТОМАТСКА РЕГУЛАЦИЈА ГАСНИХ ТУРБИНА	258
22. ЛИТЕРАТУРА	263
23. ИНДЕКС ПОЈМОВА	266
ПРИЛОГ	271

ПРЕДГОВОР

Топлотне турбомашине спадају у ред најзначајнијих погонских машина у енергетици, ваздухопловству и поморском саобраћају. Парне турбине, као саставни део парног блока, заузимају доминантно место у производњи електричне енергије, док су гасне турбине у саставу млазних мотора најзначајнији авионски пропелзори а користе се и као бродски мотори.

Саставни део гасно-турбинских постројења су и турбокомпресори који се могу користити и независно у случају њихове примене у пнеуматском транспорту, при отпрашивању, за покретање грађевинских машина, итд., када их покрећу електромотори, мотори са унутрашњим сагоревањем или други мотори.

Развој топлотних турбомашина базиран је на знањима из више различитих фундаменталних научних области - механике, науке о материјалима, механике флуида, термодинамике, динамике гасова, аутоматског управљања, итд.

Садржај књиге одговара програмима предмета Турбомашине II и Топлотне турбомашине, који се предају студентима машинских факултета у Приштини и Нишу на смеру термоенергетика. Књига ће бити од користи и студентима који на Машинском факултету у Нишу слушају предмете Основи турбомашина и Теорија турбомашина.

У књигу је уграђено искуство аутора који већ више година држе наставу из горе поменутих предмета на Машинском факултету у Приштини и Машинском факултету у Нишу.

Аутори очекују да ће књига користити не само студентима машинских факултета већ и свршеним инжењерима других смерова који имају потребе за знањима из области термоенергетике и топлотних турбомашина.

Велику захвалност аутори дугују рецензентима: др Новици Васиљевићу, редовном професору Машинског факултета у Београду и др Слободану Лаковићу, редовном професору Машинског факултета у Нишу, који су рукопис прегледали и ставили корисне примедбе.

Захвалност заслужује и мр Предраг Рашковић, дипл.инж.маш. због труда око техничке припреме уџбеника.

За слике на корицама књиге аутори дугују захвалност колеги Ивану Кокези, дипл. инж. маш., директору представништва фирме ABB-ASEA Brown Boveri за Југославију.

Приштина - Ниш
Јануар, 1997. год.

Аутори



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.