

УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ У НИШУ

ТОПЛОТНЕ ПУМПЕ

Горан Д. Вучковић
Мирко М. Стојиљковић
Марко Г. Игњатовић
Бранка Г. Ђорђевић

Ниш, 2025.



Универзитет у Нишу
Машински факултет у Нишу

ТОПЛОТНЕ ПУМПЕ

Горан Д. Вучковић
Мирко М. Стојиљковић
Марко Г. Игњатовић
Бранка Г. Ђорђевић

Ниш, 2025.

ТОПЛОТНЕ ПУМПЕ

Аутори: Др Горан Д. Вучковић
Др Мирко М. Стојиљковић
Др Марко Г. Игњатовић
Бранка Г. Ђорђевић

Рецензенти: Др Мића Вукић, редовни професор
Машинског факултета у Нишу
Др Мирослав Кљајић, редовни професор
Факултета техничких наука у Новом Саду
Рецензије су усвојене одлуком Наставно-научног већа
Машинског факултета у Нишу бр. 612-313-5/2025
од 22.10.2025.

Издавач: Универзитет у Нишу, Машински факултет у Нишу
Александра Медведева 14
18000 Ниш — Црвени Крст, Србија
www.masfak.ni.ac.rs

Издавање је одобрено одлуком Наставно-научног већа
Машинског факултета у Нишу бр. 612-313-5-1/2025
од 22.10.2025.

За издавача: проф. др Горан Јаневски, декан

ISBN 978-86-6055-196-4

Корице: Анђела Пантић, маст. инж.

Илустрације: Анђела Пантић, маст. инж.
Дејана Ристић, маст. инж.

Лектура: Др Дејан Петковић, дипл. филол.

Тираж: 600 примерака

Штампа: PUBLIK ДОО Ваљево

Copyright © 2025. Горан Вучковић, Мирко Стојиљковић,
Марко Игњатовић и Бранка Ђорђевић.
Сва права задржавају аутори.

Предговор

Топлотне пумпе данас заузимају централно место у систему одрживих енергетских технологија. Њихова изузетна ефикасност заснива се на могућности да, уз минимални унос погонске енергије, пренесу топлоту са нижег на виши температурни ниво, обезбеђујући тиме вишеструко искоришћење уложене енергије, поготову ако се топлотни резервоар ниже температуре корисно хлади, уз истовремено корисно загревање топлотног резервоара више температуре. Као уређаји који могу користити обновљиве изворе енергије — топлоту ваздуха, воде или земљишта — топлотне пумпе представљају једно од најчистијих и најпоузданијих решења за савремено очување термичког комфора, док њихова реверзибилна природа омогућава целогодишњу експлоатацију, чиме се постиже јединствена комбинација енергетске рационалности и комфора.

У ери када центри за дигиталну обраду података троше око 1% глобалне потрошње електричне енергије, више од 90% те енергије се претвори у нискотемпературну отпадну топлоту (25 – 60°C), која представља пожељан топлотни извор за високоефикасан рад топлотних пумпи за потребе грејања зграда, припрему потрошне топле воде, или за примену у индустрији. У складу са тим, топлотне пумпе постају не само симбол високе енергетске ефикасности, већ и један од кључних чинилаца у повезивању дигиталне и одрживе енергетске будућности.

Према подацима Међународне агенције за енергију (IEA), у 2022. години на тржишту Европе пласирано је преко три милиона топлотних пумпи, што представља убедљиво највећи годишњи раст од чак 43%. Тренутно је у Европи инсталирано више од 26 милиона топлотних пумпи, а пројекције указују да ће тај број до 2030. премашити 60 милиона уређаја, што недвосмислено указује на убрзану динамику усвајања технологије топлотних пумпи у развијеним економијама, подједнако у стамбеном, јавном и индустријском сектору.

Предмет ове публикације је свеобухватно разматрање топлотних пумпи, почев од термодинамичких и физичких основа њиховог рада, преко конструктивних решења и класификација, па све до савремених технолошких тенденција и начина прорачуна енергетских перформанси. Садржај уџбеника је систематизован у осам поглавља, са јасно дефинисаном унутрашњом структуром, која омогућава поступно усвајање градива.

Прво поглавље даје уводна разматрања о значају топлотних пумпи у контексту енергетске транзиције и заштите животне средине, као и кратак историјски осврт на њихов развој. Друго поглавље разрађује термодинамичке основе, са посебним акцентом на законе термодинамике и њихове импликације на рад топлотних пумпи. Треће и четврто поглавље посвећена су расхладним флуидима, мазивима, као и изворима и понорима енергије. У петом поглављу детаљно се анализирају основне компоненте топлотних пумпи, опрема и начини мерења процесних величина, као и савремени системи управљања и аутоматизације рада, док се у шестом поглављу износи систематизација начина рада, класификација и поделе топлотних пумпи. Седмо поглавље обрађује напредне технологије, а осмо даје методологију за израчунавање енергетски перформанси топлотних пумпи у реалним условима рада.

Публикација „Топлотне пумпе” је конципирана тако да одговара наставном плану и програму предмета Топлотне пумпе на Мастер академским студијама, студијског програма Термотехника, термоенергетика и процесна техника на Машинском факултету у Нишу. У том смислу, књига је првенствено намењена студентима Машинског факултета у Нишу, као основни уџбеник за истоимени предмет. Имајући у виду актуелност теме, аутори верују да ће публикација бити од користи образовању нових генерација студената и на другим високошколским установама које изучавају област топлотних пумпи, инжењерима у пракси и истраживачима који желе да прошире своја знања, али и да ће допринети широј афирмацији топлотних пумпи као једне од кључних технологија будућности у области енергетике и заштите животне средине.

Користимо прилику да исказемо неизмерну захвалност рецензентима, проф. др Мићи Вукићу и проф. др Мирославу Кљајићу, на свеобухватном и пажљивом прегледу рукописа, отвореним дискусијама и бројним корисним саветима и сугестијама да се рукопис унапреди, и да публикација буде боља, конкретнија и актуелнија.

Посебна пажња посвећена је визуелном изгледу уџбеника, прегледности текста, квалитету слика и дијаграма, чему су својим креативним приступом, промишљеним предлозима и несебичним залагањем допринос дале Анђела Пантић и Дејана Ристић, којима се искрено захваљујемо уз дубоко поштовање за уложен труд и рад.

Велика посвећеност и предани рад лектора Дејана Петковића допринели су унапређењу прецизности и квалитету језичког изражавања у уџбенику, на чему смо изузетно захвални.

Посебну захвалност дугујемо нашим породицама на несебичној подршци, безрезервном разумевању и непресушном стрпљењу током припреме овог уџбеника. Њихова љубав, вера и толеранција били су највећа покретачка енергија када је ентузијазам посустајао, инспирација била у дефициту, а препреке изгледале непремостиво.

Бићемо захвални свим читаоцима који својим предлозима, сугестијама и запажањима допринесу да публикација „Топлотне пумпе” буде квалитетнија у наредним издањима.

У Нишу, октобра 2025.

Аутори

Садржај

Предговор	iii
Садржај	vii
Ознаке	xi
1. Увод	1
1.1. Енергија и околина	1
1.2. Кратак историјат топлотних пумпи	6
2. Термодинамичке основе	11
2.1. Први закон термодинамике	12
2.1.1. Термодинамички систем и околина	12
2.1.2. Величине стања	16
2.1.3. Термодинамичка равнотежа	18
2.1.4. Механички рад	19
2.1.5. Топлота	24
2.1.6. Енергија система	28
2.1.7. Биланс енергије за затворени систем	29
2.1.8. Биланс енергије за отворени систем	31
2.1.9. Термодинамички циклуси	33
2.2. Други закон термодинамике	36
2.2.1. Спонтани процеси и равнотежа	36
2.2.2. Неповратни и повратни процеси	37
2.2.3. Формулације Другог закона термодинамике	40
2.2.4. Последице Другог закона термодинамике	43
2.2.5. Теоријске границе ефикасности	45
2.2.6. Клаузијусова неједнакост	47
2.2.7. Ентропија	49
2.2.8. Биланс ентропије за затворени систем	52
2.2.9. Биланс ентропије за отворени систем	54
2.2.10. Топлота и рад унутрашње повратних процеса	57
2.2.11. Принцип повећања ентропије	60
2.3. Стања радних флуида	62
2.3.1. Односи између величина стања	62
2.3.2. Дијаграм величина стања	64
2.3.3. Својства реалних компресибилних флуида	65
2.3.4. Модел некомпресибилне супстанце	73
2.3.5. Модел идеалног гаса	74

2.4.	Основне компоненте и процеси	77
2.4.1.	Компресор	77
2.4.2.	Турбина	80
2.4.3.	Експанзиони вентил	83
2.4.4.	Размењивач топлоте	84
2.5.	Основни термодинамички циклуси	89
2.5.1.	Повратан Карноов циклус	89
2.5.2.	Карноов циклус са коначним разликама температура	94
2.5.3.	Пригушивање флуида у експанзионом вентилу	96
2.5.4.	Суво усисавање флуида	98
2.5.5.	Стварни циклус и неизентропско сабијање флуида	99
2.5.6.	Прехлађивање флуида	101
2.5.7.	Одвођење топлоте изнад критичне тачке флуида	103
2.5.8.	Вишеструко сабијање флуида	105
2.5.9.	Вишеструко пригушивање флуида	106
2.5.10.	Каскадно спрезање циклуса	109
3.	Расхладни флуиди и мазива	111
3.1.	Пожељне карактеристике расхладног флуида	112
3.1.1.	Термодинамичке и термофизичке особине	113
3.1.2.	Сигурносне карактеристике	113
3.1.3.	Еколошка прихватљивост	114
3.1.3.1.	Потенцијал оштећења озонског омотача	115
3.1.3.2.	Потенцијал глобалног загревања	118
3.1.3.3.	Укупни индекс еквивалентног загревања	120
3.1.4.	Економски параметри	120
3.2.	Означавање расхладних флуида	120
3.3.	Класификација расхладних флуида	122
3.3.1.	Природни расхладни флуиди	123
3.3.1.1.	Неоргански природни расхладни флуиди	123
3.3.1.2.	Органски природни расхладни флуиди	124
3.3.2.	Синтетички расхладни флуиди	125
3.3.3.	Расхладни флуиди у виду смеша	126
3.4.	Мазива	127
4.	Извори и понори енергије	129
4.1.	Извори топлотне енергије	129
4.1.1.	Околни атмосферски ваздух	131
4.1.2.	Вода	134
4.1.3.	Земља	141
4.1.4.	Отпадна топлота	145
4.2.	Извори погонске енергије	146

4.3. Понори енергије	148
5. Компоненте топлотних пумпи	151
5.1. Компресори	151
5.1.1. Погонске карактеристике компресора	153
5.1.2. Типови компресора	157
5.1.2.1. Клипни компресори	158
5.1.2.2. Ротациони компресори	162
5.1.2.3. Вијчани компресори	165
5.1.2.4. Спирални (скрол) компресори	170
5.2. Кондензатори	175
5.2.1. Ваздухом хлађени кондензатори	176
5.2.2. Водом хлађени кондензатори	181
5.2.3. Евапоративни кондензатори	187
5.3. Испаривачи	195
5.3.1. Испаривачи за хлађење ваздуха, суви испаривач	196
5.3.2. Испаривачи за хлађење течности	197
5.4. Експанзиони уређаји/вентили	205
5.4.1. Термостатски експанзиони вентил	205
5.4.2. Електронски експанзиони вентили	213
5.4.3. Капиларна цев	216
5.5. Мерна опрема, електричне инсталације и аутоматика	217
5.5.1. Мерење притиска	222
5.5.2. Мерења температуре	224
5.5.3. Мерење присуства и нивоа течности, сензори нивоа	229
6. Начини рада и поделе	233
6.1. Начини рада топлотних пумпи	233
6.2. Поделе топлотних пумпи	235
6.2.1. Подела према извору и понору топлоте	236
6.2.2. Подела према начину компресије расхладног флуида	237
6.2.2.1. Компресорске топлотне пумпе	238
6.2.2.2. Апсорпционе топлотне пумпе	242
6.2.2.3. Ејекторске топлотне пумпе	244
6.2.3. Подела према намени	246
6.2.4. Подела према изведби	247
6.3. Хибридне топлотне пумпе	255
7. Напредне технологије у сектору топлотних пумпи	257
7.1. Технологија фреквентне регулације	257
7.2. Технологија променљивог протока	260
7.3. Технологија променљиве температуре	261

7.4.	Технологија поврата топлоте	263
7.5.	Паметне топлотне пумпе	268
8.	Израчунавање енергетских перформанси топлотних пумпи	269
8.1.	Математички модел прорачуна енергетских перформанси топлотних пумпи	269
8.2.	Енергетске перформансе топлотних пумпи на пуном оптерећењу	275
8.3.	Енергетске перформансе топлотних пумпи на парцијалном оптерећењу	280
8.3.1.	Парцијално оптерећење за континуалан рад компресора	281
8.3.2.	Парцијално оптерећење за on/off погон компресора	282
8.4.	Укупни губици система генерације	283
	Литература	287

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

621.577(075.8)

ТОПЛОТНЕ пумпе / Горан Д. Вучковић ... [и др.]. -
Ниш : Универзитет, Машински факултет, 2025 (Ваљево :
Publik). - XII, 290 стр. : илустр. ; 24 cm

Тираж 600. - Библиографија: стр. 287-290.

ISBN 978-86-6055-196-4

1. Вучковић, Горан, 1971-[autor]
а) Топлотне пумпе

COBISS.SR-ID 179227913

