

PREDGOVOR

Problematika vezana za termičke procese u elektroenergetici već decenijama zaokuplja pažnju stručne i naučne javnosti. Ona je posebno aktuelna zbog toga što termički procesi nezaobilazno prate eksploataciju elemenata elektroenergetskih sistema i značajno utiču na njihove pogonske karakteristike.

Zbog toga se javila potreba da se ovoj problematici posveti odgovarajući broj nastavnih jedinica u okviru studijskih programa koje pohađaju budući inženjeri elektroenergetike. Na studijskom programu osnovnih akademskih studija Elektrotehničko i računarsko inženjerstvo modul Elektroenergetika Fakulteta tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici uveden je novi predmet koji je nazvan Termički procesi u elektroenergetici. Predavanja koja autor drži u okviru pomenutog predmeta, kao i autorov istraživački rad u oblasti termičkih procesa prethodili su pisanju ove knjige. Knjiga je namenjena, pre svega studentima studijskog programa osnovnih akademskih studija Elektrotehničko i računarsko inženjerstvo modul Elektroenergetika Fakulteta tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici, mada može poslužiti i studentima drugih studijskih programa na kojima se izučava ova materija. Prema mišljenju autora ova knjiga može biti od koristi i inženjerima koji se u praksi bave zagrevanjem i hlađenjem elemenata elektroenergetskih sistema, kao i termičkim procesima uopšte.

Autor koristi priliku da se zahvali recenzentima dr Draganu Tasiću redovnom profesoru Elektronskog fakulteta u Nišu i dr Miroljubu Jevtiću redovnom profesoru Fakulteta tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici na uloženom trudu i korisnim sugestijama koje su doprinele kvalitetnijem sadržaju knjige.

S obzirom da će se ovaj pomoćni udžbenik koristiti u nastavi na univerzitetima, autor će biti zahvalan svima koji budu dali korisne primedbe i sugestije kako bi buduće izdanje ove knjige bilo kvalitetnije.

U Kosovskoj Mitrovici, 2012. godine,

Autor

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Generisanje toplote u elementima elektroenergetskih sistema	1
1.2. Načini razmene toplote	6
1.3. Sistem jedinica	7
1.4. Kondukcija	8
1.5. Konvekcija	12
1.6. Zračenje	18
1.7. Pregled poglavlja	23
1.8. Reference	24
1.9. Primeri pitanja za proveru znanja	24
2. KONDUKCIJA	31
2.1. Opšta jednačina kondukcije	32
2.1.1. Bezdimezionalni parametri svojstveni kondukciji	35
2.2. Jednodimenzionalna stacionarna kondukcija u sistemu pravouglih koordinata	37
2.2.1. Jednoslojni ravan zid	37
2.2.2. Višeslojni ravan zid	41
2.3. Jednodimenzionalna stacionarna kondukcija u sistemu cilindričnih koordinata	45
2.3.1. Jednoslojni cilindrični zid	45
2.3.2. Višeslojni cilindrični zid	48
2.3.3. Kritični poluprečnik toplotne izolacije	51
2.4. Jednodimenzionalna stacionarna kondukcija u sistemu sferičnih koordinata	53
2.4.1. Jednoslojni i višeslojni sferični zid	53
2.5. Rashladna rebra i dodatno orebrene površine	57

2.5.1.	Opšta jednačina kondukcije kroz rashladno rebro	58
2.5.2.	Pogonske karakteristike rashladnih rebara	61
2.6.	Tranzijentna kondukcija	64
2.6.1.	Mala vrednost Biot-ovog broja ($Bi \leq 0.1$): model tela sa koncentrisanom toplotnom kapacitivnošću	64
2.6.2.	Velika vrednost Biot-ovog broja ($Bi > 0.1$): model polubeskonačnog tela	67
2.6.3.	Dubina i vreme prodiranja toplote	72
2.7.	Pregled poglavlja	77
2.8.	Reference	78
2.9.	Primeri pitanja za proveru znanja	78
3.	KONVEKCIJA	91
3.1.	Newton-Rikhman-ova jednačina konvekcije	92
3.2.	Jednačine strujanja i granični sloj fluida	94
3.2.1.	Dinamički granični sloj	95
3.2.2.	Laminarni i turbulentni granični sloj	96
3.2.3.	Termički granični sloj	98
3.2.4.	Strujanje fluida kroz cevi	100
3.2.5.	Aproksimacija graničnog sloja	102
3.2.6.	Analiza poretka veličina: laminarna prinudna konvekcija uz površinu ravne ploče	103
3.3.	Dimenzionalna analiza	105
3.3.1.	Dimenzionalna analiza – slučaj prinudne konvekcije	107
3.4.	Prinudna konvekcija	111
3.4.1.	Laminarno strujanje fluida preko ravne ploče	111
3.4.2.	Turbulentno strujanje fluida preko ravne ploče	114
3.4.3.	Laminarno strujanje fluida kroz cevi	123
3.4.4.	Turbulentno strujanje fluida kroz cevi	124
3.4.5.	Strujanje fluida preko nepomičnih tela	132
3.5.	Prirodna konvekcija	144
3.5.1.	Proračun koeficijenta konvekcije za poznatu temperaturu spoljašnje površine tela	150
3.5.2.	Proračun koeficijenta konvekcije za poznatu snagu generisanja toplote u telu	157
3.5.3.	Prirodna konvekcija sa horizontalnih ravnih ploča	163
3.5.4.	Prirodna konvekcija sa kosih ravnih ploča	170
3.5.5.	Prirodna konvekcija oko dugih horizontalnih cilindara proizvoljnog poprečnog preseka	171
3.5.6.	Prirodna konvekcija u vertikalnim i horizontalnim kanalima	173

3.5.7. Prirodna konvekcija oko tela nepravilnih oblika	184
3.6. Pregled poglavlja	185
3.7. Reference	186
3.8. Primeri pitanja za proveru znanja	187
4. ZRAČENJE	198
4.1. Osnovni pojmovi	199
4.2. Zakoni zračenja toplote	203
4.2.1. Planck-ov zakon zračenja	203
4.2.2. Rayleigh-Jeans-ov zakon zračenja	205
4.2.3. Wien-ov zakon zračenja	205
4.2.4. Stefan-Boltzmann-ov zakon zračenja	206
4.2.5. Lambert-ov zakon zračenja	208
4.2.6. Kirchhoff-ov zakon zračenja	209
4.3. Radijacioni faktori oblika i algebra faktora oblika	215
4.3.1. Radijacioni faktori oblika	215
4.3.2. Algebra faktora oblika	218
4.4. Toplotno zračenje Sunca	223
4.5. Razmena toplote zračenjem između dve paralelne sive ploče razdvojene prozračnom sredinom	225
4.6. Razmena toplote zračenjem između koncentričnih sivih cilindara razdvojenih prozračnom sredinom	227
4.7. Razmena toplote zračenjem u zatvorenom prostoru obrazovanom od N apsolutno crnih površina	229
4.8. Razmena toplote zračenjem u zatvorenom prostoru obrazovanom od N sivih površina	231
4.9. Toplotni zastori	233
4.10. Pregled poglavlja	239
4.11. Reference	240
4.12. Primeri pitanja za proveru znanja	240
5. PRIMENA MKE SOFTVERA COMSOL 4.3	247
5.1. Postavka problema: Zagrevanje i hlađenje žleba sinhrono električne mašine	247
5.2. Korak 1: Rešavana jednačina i vrsta problema	249
5.3. Korak 2: Kreiranje geometrije	252
5.4. Korak 3: Zadavanje karakteristika materijala	259
5.5. Korak 4: Zadavanje izvora toplote, početnih i graničnih uslova	261
5.6. Korak 5: Generisanje mreže	266
5.7. Korak 6: Termička analiza	269

5.8. Korak 7: Prikaz rezultata – postprocesiranje	273
5.9. Korak 8: Čuvanje kreirane datoteke i napuštanje COMSOL okruženja	278
5.10. Pregled poglavlja	279
5.11. Reference	279
5.12. Primeri pitanja za proveru znanja	279
A. DODATAK	284
A.1. Tabele	284
A.2. Reference	300