

Obsah

Seznam použitých symbolů a indexů.*)	9
1. Tepelné oběhy parních turbínových zařízení a vliv parametrů na tepelnou účinnost	11
1.1. Tepelné oběhy parních turbínových zařízení	11
1.1.1. Elektrárenské provozy	11
1.1.1.1. Kondenzační elektrárny	11
1.2. Účinnost tepelných cyklů parních turbínových zařízení	12
1.2.1. Tepelná účinnost	12
1.2.2. Termodynamická účinnost	15
1.2.3. Tepelná a termodynamická účinnost turbosoustrojí	16
1.2.4. Měrná spotřeba páry	18
1.2.5. Měrná spotřeba tepla	19
1.3. Vliv parametrů páry na tepelnou účinnost	19
1.3.1. Vliv teploty vstupní páry [T_0]	20
1.3.2. Vliv tlaku vstupní páry	21
1.3.3. Vliv protitlaku ve výstupním hrdle turbíny	24
1.4. Prostředky ke zvyšování tepelné účinnosti	25
1.4.1. Přihřívání páry v kotli	25
1.4.1.1. Tepelná účinnost cyklu při přihřívání páry v kotli	28
1.4.1.2. Parametry přihřáté páry	29
1.4.2. Ohřívání napájecí vody odběrovou párou	35
1.5. Separace a přihřívání páry v jaderných elektrárnách	37
2. Proudění páry v turbínových lopatkových mřížích	38
2.1. Úvod - typy parních turbín dle konstrukce a účelu užití	38
2.1.1. Dle směru průtoku páry:	38
2.1.2. Dle počtu stupňů:	38
2.1.3. Dle typu lopatkování:	38
2.1.4. Dle tlaku páry na výstupu z turbíny:	38
2.1.5. Turbíny s regulovanými odběry páry	40
2.2. Základní rovnice pro proudění páry v lopatkových kanálech	41
2.2.1. Stavová rovnice	41
2.2.2. Rovnice kontinuity	42
2.2.3. Rovnice změny hybnosti	43
2.2.4. Rovnice zachování energie	44
2.3. Průtok páry dýzami	45
2.3.1. Zúžená dýza	45
2.3.2. Chování zúžené dýzy při změněných podmínkách	50
2.3.3. Rozšířená (Lavalova) dýza	52
2.3.4. Chování Lavalovy dýzy při změněných podmínkách	53
2.4. Energetické ztráty při proudění reálné tekutiny	55
2.5. Turbínové lopatkové mříže	56
2.6. Ztráty energie při obtékání turbínových lopatek	58
2.6.1. Profilové ztráty pro podzvukové proudění	58
2.6.2. Okrajové ztráty	60
2.6.3. Ztráty rozvějířením	61
2.6.4. Ztráty způsobené interakcí sousedních mříží ve stupni i ve více stupňových turbínách	61
2.6.5. Ztráty spojené s nedokonalým obtékáním mříží únikem páry v turbínových stupních s oběžnými lopatkami bez bandáže	62

2.6.6.	Ztráty při proudění mokré páry	62
2.6.7.	Součinitel průtoku lopatkovou mříží.....	62
2.6.8.	Výstupní úhly z turbínových mříží.....	62
2.7.	Odklon proudu šikmo seříznutých dýz	63
2.8.	Proudění mokré páry v turbínových stupních	64
2.8.1.	Mokrá pára v rovnovážném stavu.....	64
2.8.2.	Expanze páry začínající nad horní mezní křivkou a končící v oblasti mokré páry.....	64
2.8.2.1.	Veličiny používané při vyšetřování stavu páry při expanzi v turbínových stupních .	64
2.8.2.2.	Fyzikální chování páry v oblasti mokré páry - přesycení a podchlazení	65
3.	Turbínový stupeň	70
3.1.	Přeměna energie v axiálním stupni	70
3.2.	Termodynamická lopatková účinnost turbínového stupně	77
3.2.1.	Termodynamická lopatková účinnost stupně pro obecný případ, kdy hodnota κ_{vr} není ani 1 ani 0	77
3.2.2.	Termodynamická lopatková účinnost stupně pro případ, kdy se veškerá výstupní energie využije v následujícím stupni, to je když $\kappa_{vr} = 1$ (značení [*])	79
3.2.3.	Termodynamická lopatková účinnost stupně pro případ, kdy se jedná o samostatně pracující stupeň nebo o poslední stupeň turbíny a kdy $\kappa_{vr} = 0$ a $e_0 = c_f^2/2$ (značení ^{**})	79
3.2.4.	Termodynamická lopatková účinnost stupně pro případ, kdy rovnotlaký stupeň ($\rho = 0$) pracuje s plnou ztrátou výstupní rychlosti ($\kappa_{vr} = 0$) a kdy $w_{2s} = w_1$ (značení ^{***}).....	79
3.2.5.	Poměr $(u/c_f)_{opt}$ pro stupně s různým ρ	81
3.2.6.	Termodynamická lopatková účinnost rychlostního stupně (Curtisova stupně)	84
3.3.	Návrh stupně	86
3.3.1.	Volba rozhodujících charakteristik	86
3.3.2.	Volba reakce	87
3.3.3.	Volba rychlostního poměru u/c_f	87
3.3.4.	Stanovení základních rozměrů turbínových stupňů	87
3.3.4.1.	Výpočet rozváděcího lopatkování.....	88
3.3.4.2.	Výpočet oběžného lopatkování	91
3.3.5.	Profil velmi dlouhých lopatek. Metody nakroucení lopatek	92
3.3.5.1.	Nakroucení podle zákona volného víru - konstantní cirkulace kolem profilu	94
3.3.5.2.	Nakroucení lopatky dle zákona $\alpha_1 = konst$ [konstantní výstupní úhel z rozváděcích lopatek].....	96
3.4.	Vnitřní termodynamická účinnost stupně – další přídatné ztráty.....	101
3.4.1.	Ztráta třením kol v páře	102
3.4.2.	Snížení účinnosti v důsledku částečného ostříku.....	103
3.4.3.	Ztráty netěsností labyrintových ucpávek.....	104
3.4.4.	Vliv vlhkosti páry na účinnost stupně.....	106
3.4.5.	Příklad stanovení obvodové účinnosti turbínových stupňů	108
4.	Vícestupňové parní turbíny	115
4.1.	Vlastnosti vícestupňové turbíny	115
4.1.1.	Rovnotlaká turbína.....	116
4.1.2.	Přetlaková turbína	119
4.1.3.	Shrnutí vlastností mnohostupňové turbíny	122
4.2.	Součinitel zpětného využití tepla (reheat faktor)	123
4.3.	Eroze oběžných lopatek a opatření k jejímu omezení.....	127
4.4.	Erozní koroze materiálu turbíny a potrubních systémů proudící vlhkou párou.....	135
4.5.	Vnitřní a vnější labyrintové ucpávky - systémy ucpávkové páry	136
4.6.	Osové síly v turbíně	141
4.6.1.	Osová síla řadového stupně rovnotlaké turbíny.....	141

4.6.2.	Osová síla stupňů přetlakových turbín.....	142
5.	Konstrukční návrh vícestupňové turbíny	146
5.1.	Základy konstrukčního návrhu.....	146
5.1.1.	Základní technické údaje o turbíně a turbínovém zařízení	146
5.1.2.	Tepelné schéma zařízení	146
5.1.3.	Regulační stupeň a první neregulační stupeň.....	149
5.2.	Poslední stupeň stupňové části turbíny, mezní výkon turbíny	150
5.3.	Rozdělení entalpických spádů v turbíně	154
5.4.	Přibližný výpočet účinnosti turbíny a jednotlivých úseků průtočné části – dle [1] .	157
5.5.	Určení otáček a počtu os	160
5.5.1.	Určení otáček turbíny	160
5.5.1.1.	Turbíny pro pohon elektrických generátorů.....	161
5.5.2.	Volba počtu os.....	164
6.	Průtok stupněm za změněných podmínek.....	165
6.1.	Reakce stupně za změněných podmínek	167
7.	Vlastnosti vícestupňové turbíny při změněných podmínkách	169
7.1.	Činnost parní turbíny při změně zatížení	169
7.2.	Průtok páry turbínou	169
7.2.1.	Přibližné řešení průtoku stupňovou částí turbíny.....	169
7.2.2.	Turbína s regulačním stupněm	172
7.2.3.	Turbína s regulací škrcením nebo klouzavým tlakem - vliv teploty vstupní páry	174
7.2.4.	Expanze začínající ve vlhké páře - rozšíření o suchost páry	175
7.2.5.	Regenerační odběry pro ohřívání vlastního kondenzátu při změně zatížení	176
7.3.	Rozdělení tlaků a tepelných spádů při změně zatížení a protitlaku	177
7.3.1.	Rozdělení tlaků a tepelných spádů při změně zatížení a protitlaku při podkritickém proudění	177
7.3.2.	Rozdělení tlaků a tepelných spádů při změně zatížení a protitlaku při kritickém proudění	180
7.4.	Proudění turbínou s různými typy regulace při změně hmotnostního průtoku páry	180
7.4.1.	Regulace škrcením.....	181
7.4.2.	Regulace skupinová.....	182
7.4.3.	Regulace klouzavým tlakem.....	185
7.4.4.	Porovnání způsobů regulace parní turbíny	186
7.5.	Vnější vlivy na průtok turbínou	190
7.5.1.	Vliv změny vstupního tlaku	190
7.5.2.	Vliv změny teploty vstupní páry	194
7.5.2.1.	Turbíny na přehřátou páru.....	194
7.5.2.2.	Turbína na sytou páru.....	198
7.5.3.	Vliv změny protitlaku.....	200
7.5.3.1.	Změna výkonu kondenzační turbíny jako změna výkonu posledního stupně.....	201
8.	Kondenzace páry u parních turbín	208
8.1.	Popis systému kondenzace	208
8.2.	Požadavky na kondenzátor parní turbíny	210
8.3.	Sdílení tepla v povrchovém kondenzátoru	211
8.3.1.	Tlak v kondenzátoru v závislosti na teplotě chladicí vody vstupující do kondenzátoru [t_{1v}]	214
8.4.	Nekondenzovatelné plyny v kondenzátoru a ve vakuové části potrubního systému, jejich odsávání.....	215
8.4.1.	Vzduch a nekondenzovatelné plyny v kondenzátoru.....	216

8.4.2.	Průtok vzduchu přísávaného netěsnostmi do vakuového systému a odsávaného vodoproudými vývěvami	216
8.4.2.1.	Určení hmotnostního průtoku vzduchu přísávaného do vakuového systému a odsávaného vývěvami pomocí změřené charakteristiky vývěv	216
8.4.2.2.	Určení hmotnostního průtoku vzduchu přísávaného do vakuového systému a odsávaného vývěvami pomocí měřeného spadku vakua v kondenzátoru turbíny	220
8.4.3.	Odsávání nekondenzovatelných plynů paroproudými vývěvami.....	220
8.5.	Kondenzátor při změněných provozních podmínkách.....	224
8.5.1.	Změna tlaku v kondenzátoru při změně zatížení turbíny.....	224
9.	Regenerace – ohřívání kondenzátu odběrovou párou	226
9.1.	Teoretická ideální regenerace	226
9.2.	Jednostupňový ohřev kondenzátu parního turbínového zařízení a vícestupňový ohřev kondenzátu	228
9.3.	Teplota napájecí vody	230
9.4.	Schéma a provedení regeneračního systému.....	231
9.4.1.	Nízkotlaká regenerace	232
9.4.2.	Napájecí nádrž.....	233
9.4.3.	Vysokotlaká regenerace	234
9.5.	Tepelný výpočet regeneračních ohříváků	235
9.6.	Návrh a výpočet tepelného schématu.....	236
9.6.1.	Volba teploty napájecí vody	236
9.6.2.	Počet regeneračních stupňů a jejich rozdělení	236
9.6.3.	Příklad výpočtu regenerace turbíny s přehříváním páry	238
9.6.3.1.	Tepelná bilance vysokotlakého ohříváku č. 3 (nejvýše řazený) pro zvolený průtok napájecí vody $\dot{m}_v = 100 \text{ kg/s}$	241
9.6.3.2.	Tepelná bilance vysokotlakého ohříváku č. 2	241
9.6.3.3.	Tepelná bilance vysokotlakého ohříváku č. 1	242
9.6.3.4.	Teplota napájecí vody na vstupu do kotle.....	242
9.6.3.5.	Průtok odběrové páry do odplynováku	243
9.6.3.6.	Nízkotlaká regenerace	243
9.6.3.7.	Průtok páry do kondenzátoru	243
9.6.3.8.	Průtok páry pro pohon turbonapáječky	243
10.	Separace vlhkosti a přehřívání páry u turbín v jaderných elektrárnách s tlakovodním reaktorem.	245
10.1.	Účel systému	245
10.2.	Volba dělicího tlaku p_d , při kterém se provádí separace vlhkosti a přehřívání páry	248
10.3.	Hlavní zařízení systému separace a přehřívání páry.....	249
11.	Základ turbosoustrojí	254
11.1.	Pevný rámový základ	255
11.2.	Pružně uložená základová deska na železobetonové turbostolici	256
11.3.	Uložení turbíny na základu	258
11.3.1.	Pevný základ a konstrukce turbosoustrojí, kdy se celá statorová soustava posouvá po kozlících základu.....	259
11.3.2.	Pružný základ a konstrukce turbosoustrojí s ložiskovými stojany pevně připojenými ke kozlíkům	260
11.4.	Rotorová soustava	265
11.5.	Deformace základu po najetí turbosoustrojí	266
12.	Chladicí okruh kondenzátoru	267
12.1.	Zařízení chladicího okruhu	267
12.2.	Chladicí věže	267

12.2.1.	Přenos tepla v chladicích věžích.....	269
12.2.2.	Provoz chladicích věží.....	275
12.2.2.1.	Problémy v zimním období.....	275
12.2.3.	Měření chladicích věží	276
12.2.3.1.	Chladicí účinek – chladicí křivky	276
12.2.3.2.	Tepelná charakteristika chladicí věže	277
12.2.3.3.	Odporová charakteristika věže.....	279

[6]	Máňovský, O.: Hydromechanika. SNTL, Praha 1968	[m]
[7]	Bečvář, J.: Tepelné turbíny. SNTL, Praha 1968	[kg/kg]
[8]	Mikyska, J., Šebek, J.: Chladicí věže. SNTL, Praha 1989	[kg/kg]
[9]	Zouhar, K.: Heat and mass transfer in cooling tower packings. SNTL, Praha 1989	[m]
[10]	Saxena, S. N.: Diffusion of heat and mass. SNTL, Praha 1989	[l]
	Seznam použitých literatury je uveden na konci každé kapitoly.	
		[kg/kg]
		[kg/kg]
		[m]
		[l]
		[-]
		[kg/s]
		[kg/s]
		[l]
		[Nm]
		[kg/h]
		[-]
		[1/s]
		[Pa]
		[kW, MW]
		[l]
		[kg/kg]
		[W/m]
		[kg]
		[W/m]
		[W]
		[l]
		[kJ/kWh]
		[J/(kg · K)]
		[m]
		[l]
		[m]
		[m]
		[kJ/kgK]
		[m ²]
		[m]
		[m]
		[l]
		[°C]
		[K]