

Obsah

OBSAH	5
PŘEHLED NEJDŮLEŽITĚJŠÍCH ZNAČEK A SYMBOLŮ	7
ČÁST I - PARNÍ TURBÍNY	9
ČÁST II - TURBOKOMPRESORY	135
ČÁST III - PLYNOVÉ TURBÍNY	193

ρ	[kg/m ³]	hustota
σ	[kg/m ²]	hmotnostní průtok
φ	[rad]	výkon
M	[Nm]	moment
η	[-]	tepelná účinnost
η_{mech}	[-]	termodynamická účinnost
$\dot{Q}$	[J/s]	tepelná práce
$\dot{Q}_{převod}$	[J/s]	měra přivodu, ovládací teplo
ω	[1/s]	otáčky
c	[m/s]	rychlost absolutní
w	[m/s]	rychlost relativní
c_{rel}	[m/s]	relativní rychlost
$\dot{Q}_p, \dot{Q}_d$	[W, MW]	práce přivodu, práce odvodu
L	[m, mm]	délka
S	[m ²]	plocha

VT		výškový turbínový
ST		středový turbínový
NT		nížkový turbínový
VTO		výškový turbínový
NTO		nížkový turbínový
O		odpověď

Obsah

OBSAH	11
SEZNAM OBRÁZKŮ	13
KAPITOLA 1 : ÚVOD	17
1.1 ZÁKLADNÍ PRACOVNÍ CYKLUS PARNÍHO STROJE	18
1.2 VÝHODY PARNÍ TURBÍNY OPROTI PARNÍMU STROJI	20
1.3 ROZVOJ VĚDY A TECHNIKY – PŘEDPOKLAD ÚSPĚŠNÉHO ROZVOJE PARNÍ TURBÍNY	20
1.4 PŘÍKLADY PROVEDENÍ PRVNÍCH PARNÍCH TURBÍN	25
KAPITOLA 2 : KLASIFIKACE PARNÍCH TURBÍN	27
2.1 POUŽITÍ PARNÍCH TURBÍN	27
2.2 ROZDĚLENÍ PARNÍCH TURBÍN	27
2.2.1 Podle principu přeměny energie	27
2.2.2 Podle počtu stupňů	29
2.2.3 Podle směru toku páry	30
2.2.4 Podle parametrů páry na vstupu do turbíny	31
2.2.5 Podle tlaku za posledním stupněm	31
2.3 VOLBA OTÁČEK TURBÍNY	37
2.3.1 Klasické elektrárny	37
2.3.2 Turbíny v jaderných elektrárnách	37
2.3.3 U turbín malých výkonů	38
2.3.4 Turbíny pro pohon turbokompresorů	38
KAPITOLA 3 : CYKLUS PARNÍ TURBÍNY	39
3.1 PŘEMĚNA ENERGIE V PARNÍ TURBÍNĚ	39
3.2 ZÁKLADNÍ SCHÉMA ZAŘÍZENÍ S PARNÍ TURBÍNOU	40
3.3 IDEÁLNÍ OBĚH STROJE	41
3.4 OBĚH STROJE SE ZTRÁTAMI	42
3.5 URČENÍ VÝKONU STROJE	43
3.6 TERMODYNAMICKÁ ÚČINNOST ZAŘÍZENÍ	44
3.7 TEPELNÁ (TERMICKÁ) ÚČINNOST ZAŘÍZENÍ	45
3.7.1 Tepelná účinnost vyjádřená pomocí teoretického výkonu P_t	45
3.7.2 Tepelná účinnost zařízení s uvažováním vlastní spotřeby elektrárny	46
3.7.3 Měrná spotřeba tepla	47
3.7.4 Měrná spotřeba páry	47
3.8 MOŽNOSTI ZVÝŠENÍ TEPELNÉ ÚČINNOSTI ZAŘÍZENÍ	50
3.8.1 Zvýšení vstupní teploty páry do turbíny	50
3.8.2 Zvýšení vstupního tlaku páry do turbíny	51
3.8.3 Ohřívání napájecí vody parou odebíranou z turbíny (regenerace)	53
3.8.4 Přihřívání páry po částečné expanzi	58
3.8.5 Binární (dvoulátkové) oběhy	61
KAPITOLA 4 : IZENTROPICKÉ PROUDĚNÍ DOKONALÉ TEKUTINY	64
4.1 PROUDĚNÍ NEROZŠÍŘENOU DÝZOU	64
4.2 PROUDĚNÍ ROZŠÍŘENOU DÝZOU	68

4.2.1 Chování dýzy rozšířené při snižování protitlaku p_2	70
4.3 ZTRÁTA VOLNOU EXPANZÍ.....	70
4.4 ODKLON PROUDU V ŠIKMÉM SEŘÍZNUTÍ DÝZY.....	73
4.5 PROUDĚNÍ DÝZOU SE ZTRÁTAMI	74
KAPITOLA 5 : TYPY TURBÍNOVÝCH STUPŇŮ	76
5.1 ROVNOTLAKÝ STUPEŇ	76
5.1.1 Ztráty a obvodová účinnost rovnotlakého stupně – metoda nepřímá	78
5.2 PŘETLAKOVÝ STUPEŇ.....	80
5.3 CURTISŮV STUPEŇ	81
5.4 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH TYPŮ STUPŇŮ	84
KAPITOLA 6 : TEORIE TURBÍNOVÝCH STUPŇŮ	85
6.1 VÝPOČET DÉLKY LOPATKY	85
6.1.1 Délka rozváděcích lopatek při plném (totálním) ostříku	85
6.1.2 Délka oběžných lopatek.....	87
6.1.3 Poznámka k nepřímé metodě určování účinnosti turbínového stupně.....	87
6.2 PŘÍMÁ METODA URČENÍ OBVODOVÉ ÚČINNOSTI.....	88
6.3 PARCIÁLNÍ (ČÁSTEČNÝ) OSTŘÍK	91
6.4 OSTATNÍ ZTRÁTY VE STUPNI	95
6.4.1 Ztráta rozdílnou roztečí lopatek (rozvějířením)	95
6.4.2 Ztráta vlivem vlhkosti páry	95
6.4.3 Ztráta škrcením v rozvodu turbíny	96
6.4.4 Ztráta netěsností (únikem).....	97
KAPITOLA 7 : REGULACE TURBÍN	100
7.1 REGULACE ŠKRCENÍM	100
7.2 REGULACE SKUPINOVÁ	101
7.2.1 Výpočet difuzorového ventilu	103
7.3 REGULACE KLOUZAVÝM TLAKEM	104
KAPITOLA 8 : VÍCESTUPŇOVÉ PARNÍ TURBÍNY	105
8.1 SOUČINITEL ZPĚTNĚ VYUŽITÉHO TEPLA (REHEAT FACTOR)	105
8.2 PŘEPOČET ROZDĚLENÍ TLAKŮ PŘI ZMĚNĚ VSTUPNÍHO MNOŽSTVÍ	107
8.3 CHARAKTERISTIKA TURBÍNY	108
8.3.1 Charakteristika kondenzační turbíny	108
8.3.2 Charakteristika turbíny s jedním regulovaným odběrem	110
LITERATURA K ČÁSTI I.....	111
PŘÍLOHY.....	113

Seznam obrázků

OBR. 1: JAMES WATT (1736–1819).....	18
OBR. 2: JOSEF BOŽEK A JEHO PARNÍ VŮZ (1782–1835).....	19
OBR. 3: WERNER VON SIEMENS (1816–1892).....	19
OBR. 4: JULIUS EMANUEL CLAUSIUS (1822–1888).....	20
OBR. 5: NICOLAS LEOPARD SADI CARNOT (1796–1832)	20
OBR. 6: ANDERS CELSIUS (1701–1744).....	21
OBR. 7: AUREL STODOLA (1859–1942).....	22
OBR. 8: JAN KIESWETTER (1879–1959)	22
OBR. 9: LADISLAV MIŠKOVSKÝ (1893–1953).....	23
OBR. 10: JOSEF BEČVÁŘ (1900–1969).....	23
OBR. 11: JAN JERIE (1913–2002).....	24
OBR. 12: JAN ZVONEČEK (1865–1926)	24
OBR. 13: JAN JŮZA (1905–1991).....	24
OBR. 14: MIROSLAV DLOUHÝ (1914–1998)	24
OBR. 15: GUSTAV PATRIK DE LAVAL (1845–1913)	25
OBR. 16: LAVALOVA TURBÍNA (1883)	25
OBR. 17: CHARLES ALGERNON PARSONS (1854–1931)	25
OBR. 18: PARSONSOVA TURBÍNA (1884)	25
OBR. 19: TURBÍNA PRVNÍ BRNĚNSKÉ STROJÍRNY (1903).....	26
OBR. 20: ROVNOTLAKÁ PARNÍ TURBÍNA	28
OBR. 21: PŘETLAKOVÁ PARNÍ TURBÍNA	28
OBR. 22: JEDNOSTUPŇOVÁ TURBÍNA – ROVNOTLAKÝ STUPEŇ	29
OBR. 23: JEDNOSTUPŇOVÁ TURBÍNA – CURTISŮV STUPEŇ	29
OBR. 24: RADIÁLNÍ NEPROTIBĚŽNÁ (SIEMENS)	30
OBR. 25: RADIÁLNÍ PROTIBĚŽNÁ (LJUNGSTRÖME).....	30
OBR. 26: SCHÉMA KONDENZAČNÍ TURBÍNY.....	31
OBR. 27: KONDENZAČNÍ TURBÍNA ROVNOTLAKÁ, TŘÍTĚLESOVÁ S PŘÍHŘÍVÁNÍM PÁRY, 100 MW.....	32
OBR. 28: JEDNOTĚLESOVÁ KONDENZAČNÍ TURBÍNA.....	32
OBR. 29: SCHÉMA PROTITLAKÉ TURBÍNY	33
OBR. 30: PROTITLAKÁ TURBÍNA ROVNOTLAKÁ	34
OBR. 31: PROTITLAKOVÁ TURBÍNA PŘETLAKOVÁ.....	34
OBR. 32: SCHÉMA TURBÍNY S JEDNÍM REGULOVANÝM ODBĚREM.....	35
OBR. 33: DVOUTĚLESOVÁ PŘETLAKOVÁ TURBÍNA S JEDNÍM REGULOVANÝM ODBĚREM PÁRY	36
OBR. 34: JEDNOTĚLESOVÁ ROVNOTLAKÁ TURBÍNA S JEDNÍM REGULOVANÝM	36
OBR. 35: TURBÍNA 500 MW NA SYTOU VSTUPNÍ PÁRU, OTÁČKY 3000 MIN ⁻¹	37
OBR. 36: TURBÍNA 650 MW NA SYTOU VSTUPNÍ PÁRU, OTÁČKY 1500 MIN ⁻¹	37
OBR. 37: PŘEMĚNA ENERGIE V PARNÍ TURBÍNĚ	39
OBR. 38: ZÁKLADNÍ SCHÉMA ZAŘÍZENÍ	40
OBR. 39: IDEÁLNÍ OBĚH STROJE V T-S DIAGRAMU	40
OBR. 40: IDEÁLNÍ OBĚH STROJE V I-S DIAGRAMU.....	40
OBR. 41: OBĚH STROJE SE ZTRÁTAMI V T-S DIAGRAMU	42
OBR. 42: OBĚH STROJE SE ZTRÁTAMI V I-S DIAGRAMU	42
OBR. 43: ÚČINNOSTI H_{MECH} , H_{PR} A H_{GEN} V ZÁVISLOSTI NA VÝKONU SOUSTROJÍ	44
OBR. 44: PRŮBĚH A DEFINICE TERMODYNAMICKÉ ÚČINNOSTI NA TRASE TURBÍNA – GENERÁTOR.....	45

OBR. 45: OBĚH PARNÍ TURBÍNY S UVAŽOVÁNÍM PŘÍKONU NAPÁJEČKY V T-S DIAGRAMU	46
OBR. 46: ÚČINNOST CYKLU V ZÁVISLOSTI NA VSTUPNÍM TLAKU	48
OBR. 47: MĚRNÁ SPOTŘEBA TEPLA V ZÁVISLOSTI NA VSTUPNÍM TLAKU PRO RŮZNÉ VÝKONY TURBÍNY	49
OBR. 48: URČENÍ STŘEDNÍ TEPLoty PŘÍVODU TEPLA	50
OBR. 49: ZVÝŠENÍ VSTUPNÍ TEPLoty PÁRY.....	51
OBR. 50: ZVÝŠENÍ VSTUPNÍHO TLAKU	52
OBR. 51: TEPELNÁ ÚČINNOST DÍLČÍCH OBĚHŮ V T-S DIAGRAMU	54
OBR. 52: OBĚH SE SYTOU VSTUPNÍ PAROU V T-S DIAGRAMU.....	54
OBR. 53: ZISK NA TEPELNÉ ÚČINNOSTI PŘI URČITÉM POČTU OHŘÍVÁKŮ OPROTI $N \rightarrow \infty$	55
OBR. 54: VÝVOJ TLAKU A TEPLoty PÁRY NA VSTUPU DO TURBÍNY	58
OBR. 55: EROZNÍ POŠKOZENÍ OBĚŽNÝCH LOPATEK	58
OBR. 56: OPTIMÁLNÍ TLAK PŘI PŘIHRÍVÁNÍ	59
OBR. 57: TEPELNÉ SCHÉMA TURBÍNY S PŘIHRÍVÁNÍM PÁRY.....	60
OBR. 58: OBĚH S PŘIHRÍVÁNÍM PÁRY	61
OBR. 59: DVOULÁTKOVÝ OBĚH - RTUŤOVÁ A VODNÍ PÁRA	62
OBR. 60: ŘEZ RTUŤOVOU TURBÍNOU	62
OBR. 61: SCHÉMA ZAŘÍZENÍ RTUŤ – VODNÍ PÁRA	62
OBR. 62: DÝZA NEROZŠÍŘENÁ	64
OBR. 63: EXPANZE V P-V DIAGRAMU	64
OBR. 64: MNOŽSTVÍ JAKO FUNKCE POMĚRU P_2/P_1	66
OBR. 65: RYCHLOST JAKO FUNKCE POMĚRU P_2/P_1	66
OBR. 66: EXPANZE V I-S DIAGRAMU	66
OBR. 67: DÝZA ROZŠÍŘENÁ	69
OBR. 68: PŘEHLED TLAKŮ PŘI ZTRÁTĚ VOLNOU EXPANZÍ V I-S DIAGRAMU	71
OBR. 69: ZTRÁTA VOLNOU EXPANZÍ ZA DÝZOU NEROZŠÍŘENOU	71
OBR. 70: ODKLON PROUDU V ŠIKMÉM SEŘÍZNUTÍ DÝZY	73
OBR. 71: PROUDĚNÍ DÝZOU SE ZTRÁTAMI.....	74
OBR. 72: DEFINICE STUPNĚ REAKCE	76
OBR. 73: ŘEZ ROVNOTLAKÝM STUPNĚM	77
OBR. 74: RYCHLOSTNÍ TROJÚHELNÍKY ROVNOTLAKÉHO STUPNĚ.....	77
OBR. 75: ÚHEL OTOČENÍ PROUDU V OBĚŽNÝCH LOPATKÁCH.....	78
OBR. 76: EXPANZE A ZTRÁTY V ROVNOTLAKÉM STUPNI	79
OBR. 77: OBVODOVÁ ÚČINNOST ROVNOTLAKÉHO STUPNĚ.....	79
OBR. 78: RYCHLOSTNÍ TROJÚHELNÍKY PŘETLAKOVÉHO STUPNĚ	80
OBR. 79: ŘEZ CURTISOVÝM STUPNĚM	82
OBR. 80: EXPANZE A ZTRÁTY V CURTISOVĚ STUPNI	82
OBR. 81: RYCHLOSTNÍ TROJÚHELNÍKY V CURTISOVĚ STUPNI	82
OBR. 82: OBVODOVÉ ÚČINNOSTI STUPŇŮ	84
OBR. 83: TOTÁLNÍ OSTŘÍK STUPNĚ	86
OBR. 84: VÝSTUP Z ROZVÁDĚCÍCH LOPATEK	86
OBR. 85: PŘESAHOVÁNÍ OBĚŽNÝCH LOPATEK VŮČI ROZVÁDĚCÍM	87
OBR. 86: PŘEHLED ZTRÁT V TURBÍNOVÉM STUPNI	88
OBR. 87: SCHÉMA EXPERIMENTÁLNÍHO ZAŘÍZENÍ	89
OBR. 88: KŘIVKY ÚČINNOSTI ROVNOTLAKÉHO STUPNĚ	90
OBR. 89: PARCIÁLNÍ OSTŘÍK STUPNĚ	91
OBR. 90: NEJVÝHODNĚJŠÍ A REDUKOVANÁ DÉLKA LOPATKY	92
OBR. 91: ÚNIK RADIÁLNÍ VŮLÍ PŘETLAKOVÉHO STUPNĚ.....	93

OBR. 92: ZTRÁTA ROZVĚJÍŘENÍM	95
OBR. 93: RYCHLOSTNÍ TROJÚHELNÍKY PRO PARNÍ A KAPALNOU FÁZI.....	96
OBR. 94: ŠKRCENÍ V ROZVODU TURBÍNY.....	96
OBR. 95: LABYRINTOVÁ UCPÁVKA	97
OBR. 96: DETAIL BŘITŮ A RADIÁLNÍ VŮLE Δ_R	97
OBR. 97: PROCES V LABYRINTOVÉ UCPÁVCE	97
OBR. 98: PRŮTOKOVÝ SOUČINITEL UCPÁVKY	99
OBR. 99: REGULACE ŠKRCENÍM – TLAKOVÉ POMĚRY	100
OBR. 100: REGULACE ŠKRCENÍM I-S DIAGRAM.....	101
OBR. 101: REGULACE SKUPINOVÁ.....	101
OBR. 102: TRAVERZOVÁ REGULACE (SKUPINOVÁ)	102
OBR. 103: DVOUSEDLÝ VENTIL.....	103
OBR. 104: REGULACE KLOUZAVÝM TLAKEM	104
OBR. 105: SOUČINITEL ZPĚTNĚ VYUŽITÉHO TEPLA	106
OBR. 106: REHEAT FACTOR V ZÁVISLOSTI NA POMĚRU TLAKŮ PŘED A ZA TURBÍNOU	106
OBR. 107: ROZDĚLENÍ TLAKŮ PŘI ZMĚNĚ MNOŽSTVÍ.....	107
OBR. 108: CHARAKTERISTIKA KONDENZAČNÍ TURBÍNY	108
OBR. 109: MNOŽSTVÍ PRO CHOD TURBÍNY NAPRÁZDNO.....	109
OBR. 110: CHARAKTERISTIKA TURBÍNY S JEDNÍM REGULOVANÝM ODBĚREM M_0	110