

## Obsah

Předmluva . . . . .	9
Přehled nejdůležitějších označení . . . . .	10

### I. Úvod

1.1 Ekonomické výsledky automatizace energetických zařízení . . . . .	13
1.2 Předpoklady automatizace tepelných energetických zařízení . . . . .	15
2. Základy teorie regulační techniky . . . . .	16
2.1 Dynamické vlastnosti členů regulačních obvodů . . . . .	17
2.1.1 Vlastnosti lineárních členů . . . . .	18
2.1.2 Klasické řešení lineární diferenciální rovnice členu . . . . .	18
2.2 Základy Laplaceovy—Wagnerovy transformace . . . . .	21
2.2.1 Pravidla Laplaceovy—Wagnerovy transformace . . . . .	23
2.2.2 Zpětná Laplaceova—Wagnerova transformace . . . . .	26
2.2.3 Příklady výpočtu zpětné transformace . . . . .	27
2.2.4 Řešení lineárních diferenciálních rovnic pomocí Laplaceovy—Wagnerovy transformace . . . . .	28
2.2.5 Počáteční podmínky . . . . .	30
2.3 Přenosy soustav, regulátorů a obvodů . . . . .	31
2.3.1 Algebra přenosů . . . . .	32
2.3.2 Přenosy regulovaných soustav a regulátorů . . . . .	33
2.3.3 Přenos rozpojeného regulačního obvodu . . . . .	39
2.3.4 Přenosy uzavřeného regulačního obvodu . . . . .	40
2.4 Základní operace s komplexními čísly . . . . .	42
2.5 Geometrická místa stejných fázových úhlů . . . . .	44
2.6 Metoda geometrického místa kořenů . . . . .	48
2.6.1 Pravidla pro kreslení geometrického místa kořenů . . . . .	51
2.6.2 Příklad použití metody geometrického místa kořenů . . . . .	53
2.6.3 Činitel poměrného tlumení $D$ . . . . .	62
2.6.4 Hodnocení metody geometrického místa kořenů . . . . .	64
2.7. Aproximace přenosů pomocí dominantního páru kořenů . . . . .	65
2.7.1 Dominantní kořeny . . . . .	65
2.7.2 Základy aproximace . . . . .	68
2.7.3 Pomocné grafy . . . . .	70
2.8 Řešení úloh regulační techniky počítači . . . . .	73



## II. Dynamické vlastnosti tepelných energetických zařízení

3. Regulace napájení . . . . .	77
3.1 Základní dynamické vztahy . . . . .	78
3.2 Návrh regulačního obvodu napájení . . . . .	81
3.3 Nastavení regulátorů a vliv konstrukčních parametrů . . . . .	83
4. Dynamické vlastnosti regulačního obvodu přívodu paliva u kotlů s mezizásobníky prášku . . . . .	84
4.1 Přenos regulované soustavy . . . . .	86
4.1.1 Parovodní prostor kotle . . . . .	86
4.1.2 Teplosměnné plochy kotle . . . . .	93
4.1.3 Úsek podávání paliva . . . . .	96
4.1.4 Výsledný přenos regulované soustavy obvodu přívodu paliva u kotlů . . . . .	96
4.2 Výpočet konstant přenosu regulované soustavy . . . . .	97
4.2.1 Konstanty $a_t$ a $a_k$ . . . . .	97
4.2.2 Konstanty tepelné a objemové akumulace . . . . .	98
4.3 Příklad výpočtu regulačního obvodu přívodu paliva . . . . .	101
4.3.1 Konstanty přenosu regulované soustavy . . . . .	102
4.3.2 Aproximace přenosu rozpojeného regulačního obvodu . . . . .	105
4.3.3 Přejímová charakteristika tlaku páry při regulačním pochodu . . . . .	108
4.4 Nastavení konstant regulátorů a vliv provozních poměrů . . . . .	110
4.4.1 Poruchy vstupující do regulačního obvodu přívodu paliva . . . . .	110
4.4.2 Regulované veličiny . . . . .	111
4.4.3 Nastavení konstant regulátorů . . . . .	112
4.4.4 Vliv provozních poměrů . . . . .	114
4.5 Vliv konstrukčních parametrů . . . . .	114
5. Regulace přívodu paliva u kotlů s přímým foukáním prášku . . . . .	116
5.1 Dynamické vlastnosti mlýnů . . . . .	116
5.2 Příklad výpočtu . . . . .	118
5.3 Nastavení konstant regulátoru . . . . .	121
5.4 Vliv konstrukčních parametrů . . . . .	124
6. Regulace spalování . . . . .	125
6.1 Dynamické vlastnosti obvodu přívodu vzduchu . . . . .	126
6.2 Ovládání přívodu vzduchu podle průtoku páry . . . . .	127
6.3 Porovnání hlavních signálů pro regulaci přívodu paliva u kotlů . . . . .	129
6.4 Pomocné signály pro regulaci spalování . . . . .	133
6.5 Novější schémata regulačních obvodů spalování . . . . .	138
6.6 Regulace spalování signálem podle údajů analyzátoru spalin . . . . .	146
6.7 Nastavení konstant regulátorů a vliv konstrukčních parametrů . . . . .	147
7. Regulace přehřátí . . . . .	148
7.1 Základní vztahy . . . . .	148
7.2 Příklad výpočtu . . . . .	153
7.2.1 Konstrukce geometrického místa kořenů . . . . .	154
7.2.2 Přejímová charakteristika . . . . .	156
7.3 Návrh schématu regulačního obvodu přehřátí a nastavení konstant regulátorů . . . . .	158
7.3.1 Výpočet dynamických vlastností regulačního obvodu přehřátí páry v posledním dílu přehříváku . . . . .	158
7.3.2 Nastavení konstant regulátorů . . . . .	163
7.3.3 Pomocné signály . . . . .	166
7.3.4 Schémata regulačního obvodu přehřátí páry v předposledním dílu přehříváku . . . . .	166



7.4	Regulace přehřátí páry . . . . .	167
7.5	Vliv konstrukčních dat . . . . .	168
7.6	Vhodná délka přehříváku . . . . .	169
8.	Ostatní regulační obvody kotle . . . . .	170
8.1	Regulace tlakové diference na napájecím ventilu . . . . .	170
8.2	Regulace podtlaku ve spalovací komoře . . . . .	171
8.3	Regulace ústředních mlýnů . . . . .	173
8.4	Některé další regulační obvody . . . . .	174
9.	Dynamické vlastnosti průtočných kotlů . . . . .	175
9.1	Regulační obvod napájení . . . . .	178
9.2	Regulační obvod přívodu paliva . . . . .	181
9.3	Schémata regulačních obvodů průtočných kotlů . . . . .	185
10.	Dynamické vlastnosti parních turbín . . . . .	189
10.1	Základní dynamické rovnice parních turbín . . . . .	189
10.1.1	Kondenzační turbína . . . . .	189
10.1.2	Protitlaká turbína . . . . .	192
10.1.3	Kondenzační turbína s přehřívákem . . . . .	192
10.1.4	Dynamická rovnice výkonu turbíny . . . . .	193
10.2	Regulace počtu otáček turbíny . . . . .	196
10.2.1	Rovnice rotoru turbogenerátoru . . . . .	196
10.2.2	Přenos rozpojeného regulačního obvodu otáček turbíny . . . . .	197
10.2.3	Řešení uzavřeného regulačního obvodu otáček turbíny . . . . .	198
10.3	Regulace počtu otáček při úplném odlehčení turbíny . . . . .	200
10.4	Regulace tlaku páry před turbínou . . . . .	202

### III. Závěrečná část

11.	Některé speciální otázky výpočtů dynamiky tepelných energetických zařízení a teorie několikaparametrových obvodů . . . . .	204
11.1	Linearizace dynamických rovnic . . . . .	204
11.2	Dynamika přestupu tepla . . . . .	206
11.2.1	Přestup tepla sáláním . . . . .	206
11.2.2	Prostup tepla stěnou . . . . .	206
11.3	Teoretické základy řešení regulačního obvodu přehřátí . . . . .	211
11.3.1	Přenosy přehříváku . . . . .	211
11.3.2	Řešení regulačního obvodu přehřátí pomocí geometrických míst stejných fázových úhlů . . . . .	212
11.3.3	Přechodová charakteristika teploty páry na konci přehříváku při regulačních pochodech . . . . .	213
11.4	Odvození aproximace přenosů pomocí dominantních kořenů . . . . .	216
11.5	Základy teorie několikaparametrových regulačních obvodů . . . . .	219
11.5.1	Obecné řešení podmínek autonomnosti . . . . .	219
11.5.2	Podmínky autonomnosti a invariantnosti kotelní regulace . . . . .	222
12.	Perspektivy automatizace tepelných energetických zařízení . . . . .	223
12.1	Adaptivní a extrémální regulátory . . . . .	223
12.2	Použití metod statistické dynamiky . . . . .	225
12.3	Měření a řídicí ústředny . . . . .	227
12.3.1	Měřicí ústředny . . . . .	227
12.3.2	Řídicí ústředny . . . . .	228
12.3.3	Řídicí ústředna pro jednotku kotel—turbína . . . . .	231



## Dodatky

Dodatek 1. Názvosloví z oboru automatizace a regulační techniky . . . . .	234
Dodatek 2. Nastavení konstant regulátorů . . . . .	236
Dodatek 3. Přibližné určení přenosu soustavy podle změřené odezvy . . . . .	242
Dodatek 4. Tabulky $e^{-z}$ . . . . .	248
Literatura . . . . .	250
Věcný rejstřík . . . . .	254

## Seznam tabulek

Tab. 2.1. Slovník obrazů Laplaceovy—Wagnerovy transformace . . . . .	24
Tab. 2.2. Diferenciální rovnice, přenosy a přechodové charakteristiky některých typů regulovaných soustav . . . . .	34
Tab. 2.3. Charakteristické hodnoty některých regulovaných soustav . . . . .	37
Tab. 2.4. Diferenciální rovnice, přenosy a přechodové charakteristiky nejdůležitějších typů regulátorů . . . . .	38
Tab. 2.5. Geometrická místa konstantních fázových úhlů jednoduchých přenosů. . . . .	46
Tab. 2.6. Poloha kořenů v komplexní rovině. . . . .	50
Tab. 2.7. Geometrická místa kořenů odpovídající jednoduchým obvodům. . . . .	54
Tab. 2.8. Geometrická místa kořenů odpovídající složitějším obvodům. . . . .	57
Tab. 3.1. Rychlost náběhu výšky hladiny různých typů kotlů . . . . .	84
Tab. 4.1. Směrné hodnoty zpožďujících členů přenosu ohniště a teplosměnných ploch . . . . .	95
Tab. 4.2. Tabulka konstant vztahu (4.24) . . . . .	99
Tab. 4.3. Akumulační konstanta parovodního prostoru $I_k$ různých typů kotlů. . . . .	101
Tab. 4.4. Závislost konstant přenosu (4.22) na úbytku tlaku páry v přehříváku a na zatížení kotle . . . . .	101
Tab. 4.5. Charakteristické hodnoty přechodové charakteristiky tlaku páry za kotlem při regulačních pochodech . . . . .	110
Tab. 7.1. Vhodné délky přehříváků . . . . .	170
Tab. 9.1. Konstanty tepelné akumulace výparníků některých průtočných kotlů. . . . .	182