

Obsah

Předmluva	11
Seznam symbolů	13
1. ÚVOD	35
1.1. Úvod do problematiky chlazení a ventilace elektrických strojů	35
1.2. Charakteristika současného stavu	37
1.3. Vývojové tendence	38
2. AERODYNAMICKÉ ODPORY	40
2.1. Třecí odpory	42
2.2. Lokální (místní) aerodynamické odpory	57
2.2.1. Náhlé rozšíření	58
2.2.2. Výstup do neomezeného prostoru	59
2.2.3. Náhlé zúžení (kontrakce)	60
2.2.4. Vstup do kanálu z velkého prostoru	62
2.2.5. Otvor v tenké stěně	63
2.2.6. Otvor ve stěně, u něhož nedochází ke kontrakci proudu	64
2.2.7. Clona	64
2.2.8. Dýza	65
2.2.9. Náhlé zúžení přecházející do náhlého rozšíření	67
2.2.10. Ohyb	67
2.2.11. Difuzor	69
2.3. Aerodynamické odpory rotujících částí	71
2.3.1. Třecí odpory v rotujících kanálech	71
2.3.2. Lokální odpory rotujících kanálů	74
2.4. Výpočet složitých ventilačních systémů (analytické a grafické metody)	76
2.4.1. Ventilační sítě složené z aerodynamických odporů	76
2.4.2. Ventilační sítě s aerodynamickými odpory a zdroji tlaku	81
3. AERODYNAMICKÉ ODPORY VENTILAČNÍHO SYSTÉMU ELEKTRICKÉHO STROJE	86
3.1. Vnější části ventilačního systému stroje	87
3.1.1. Chladiče, filtry	87
3.1.2. Sací prostor	88
3.2. Vnitřní části ventilačního systému	89
3.2.1. Prostor čel	89
3.2.2. Přepouštěcí otvory. Radiální kanály v prstech statorových plechů	90
3.2.3. Vstup do rotoru	91
3.2.3.1. Aerodynamický odpor vstupu do rotoru rychloběžných asynchronních strojů	91
3.2.3.2. Aerodynamický odpor vstupu do rotorové hvězdy pomaloběžných asynchronních strojů	92

3.2.3.3.	Aerodynamický odpor vstupu do rotoru rychloběžných synchronních strojů s vyjádřeními póly	93
3.2.3.4.	Aerodynamický odpor vstupu do rotorové hvězdy pomaloběžných synchronních strojů s vyjádřeními póly	93
3.2.4.	Drážková část stroje	94
3.2.4.1.	Aerodynamické odpory axiálních kanálů rotoru	94
3.2.4.2.	Odpory způsobené rozšířením proudu v axiálních kanálech (za odbočkami)	94
3.2.4.3.	Odpor zpomalení proudu v axiálních kanálech asynchronních strojů	95
3.2.4.4.	Odpory zpomalení proudu v axiálních mezipólových kanálech synchronních strojů s vyjádřeními póly	95
3.2.4.5.	Vnitřní aerodynamické odpory radiálních kanálů rotoru	95
3.2.4.6.	Aerodynamické odpory statoru střídavých strojů	99
3.2.5.	Hřbetní kanál	103
3.3.	Ventilační systémy s řadou odboček	104
3.4.	Vnější ventilační okruh s chladící vzduch – vzduch	105
3.5.	Hydraulické odpory systémů s přímým chlazením	107
3.6.	Příklad výpočtu ventilace	107
4.	ZDROJE TLAKU	126
4.1.	Cizí ventilátory	126
4.2.	Vlastní ventilátory	127
4.2.1.	Podmínky práce ventilátorů vestavěných v elektrickém stroji	127
4.2.1.1.	Specifické podmínky práce radiálních ventilátorů v elektrických strojích a jejich vliv na návrh ventilátorů	127
4.2.1.2.	Specifické podmínky práce axiálních ventilátorů v elektrických strojích a jejich vliv na návrh ventilátorů	128
4.2.2.	Radiální ventilátory	129
4.2.2.1.	Teoretické základy	129
4.2.2.1.1.	Moment radiálního ventilátoru	129
4.2.2.1.2.	Teoretický příkon ventilátoru	130
4.2.2.1.3.	Teoretický tlak ventilátoru (Eulerova rovnice)	130
4.2.2.1.4.	Trojúhelníky rychlostí	130
4.2.2.1.5.	Eulerovy teoretické charakteristiky tlaku	132
4.2.2.1.6.	Teoretický výkon ideálního radiálního ventilátoru	133
4.2.2.1.7.	Tlakové číslo ψ , průtokové číslo φ a výkonové číslo λ	134
4.2.2.1.8.	Eulerovy teoretické charakteristiky tlaku v bezrozměrném tvaru	135
4.2.2.1.9.	Vliv konečného počtu lopatek oběžného kola	137
4.2.2.1.10.	Ideální charakteristika tlaku pro konečný počet lopatek	143
4.2.2.1.11.	Úbytky tlaku v oběžném kole radiálního ventilátoru	146
4.2.2.1.12.	Hydraulická účinnost η_h , objemová účinnost η_v , účinnost respektující třetí ztráty η_r , vnitřní účinnost η_i	151
4.2.2.1.13.	Využitelný statický tlak radiálních ventilátorů pracujících v elektrických strojích	152
4.2.2.1.14.	Bezrozměrný způsob vyjadřování charakteristik ventilátorů a zákony podobnosti ventilátorů	155
4.2.2.2.	Vyšetření charakteristik radiálních ventilátorů s rovnými (radiálními) lopatkami ($\beta_2 = \beta_1 = 90^\circ$)	156
4.2.2.3.	Příklad výpočtu radiálního ventilátoru s lopatkami zahnutými dozadu	160
4.2.3.	Axiální ventilátory	168
4.2.3.1.	Teorie nosné plochy	168
4.2.3.2.	Lopátkové mříže	173
4.2.3.3.	Základní rovnice axiálního ventilátoru	173

4.2.3.4.	Základní rovnice pro návrh axiálního ventilátoru	174
4.2.3.5.	Statický tlak axiálního ventilátoru pracujícího v elektrických strojích	177
4.2.3.5.1.	Kontrola proveditelnosti axiálních ventilátorů pracujících v elektrických strojích	177
4.2.3.5.2.	Statická účinnost η_s a stupeň reakce R axiálního ventilátoru pracujícího v elektrickém stroji	181
4.2.3.6.	Příklad výpočtu axiálního ventilátoru s plechovými lopatkami	183
4.2.3.7.	Výpočet části charakteristiky $\Delta p_s = f(Q)$, resp. $\psi_s = f(\varphi)$ axiálního ventilátoru	188
4.2.3.8.	Vliv mezery mezi lopatkami a hrdlem na dosažitelný tlak a účinnost axiálních ventilátorů	188
4.2.4.	Axiálně radiální ventilátory	190
4.3.	Samoventilační účinek rotoru	190
4.3.1.	Charakteristika radiálních kanálů rotoru asynchronního stroje	190
4.3.2.	Samoventilační účinek rotorů synchronních strojů s vyjádřenými póly	194
4.4.	Spolupráce ventilátorů se samoventilačním účinkem rotoru	197
4.4.1.	Spolupráce radiálních a axiálních ventilátorů se samoventilačním účinkem rotoru asynchronního stroje s radiálními ventilačními kanály	197
4.4.2.	Spolupráce radiálních a axiálních ventilátorů se samoventilačním účinkem rotoru synchronního stroje s vyjádřenými póly	198
4.5.	Ventilační ztráty zdrojů tlaku v točivých elektrických strojích	199
4.5.1.	Dosavadní způsob výpočtu ventilačních ztrát	200
4.5.2.	Výpočet ventilačního příkonu radiálních ventilátorů pomocí ideálních charakteristik tlaku	201
4.5.3.	Přibližný výpočet ventilačního příkonu axiálních ventilátorů	202
4.5.4.	Respektování objemových (volumetrických) ztrát při výpočtu ventilačního příkonu ventilátorů	204
4.5.5.	Výpočet ventilačních ztrát u rotorů s radiálními ventilačními kanály	205
4.5.6.	Výpočet ventilačních ztrát v rotoru turboalternátoru (popř. turbomotoru) s radiálními kanály	206
4.5.7.	Výpočet ventilačního příkonu u rotoru synchronního stroje s vyjádřenými póly	207
4.5.8.	Výpočet ventilačního příkonu různých ventilačních systémů	208
4.5.9.	Respektování ztrát třením při výpočtu celkového ventilačního příkonu	210
5.	DRUHY KRYTÍ A CHLAZENÍ A VENTILAČNÍ SYSTÉMY ELEKTRICKÝCH STROJŮ	212
5.1.	Souhrnný přehled druhů krytí a chlazení	212
5.1.1.	Druhy krytí	212
5.1.2.	Druhy a označování chlazení (ČSN 35 0006)	212
5.2.	Souvislost druhů chlazení s krytím elektrických strojů	216
5.3.	Porovnání strojů s různým krytím a různým chlazením z ekonomického hlediska	216
5.4.	Specifické rysy nejčastěji používaných druhů chlazení	224
5.4.1.	Otevřené stroje s vlastním chlazením	224
5.5.	Zavřené stroje	225
5.5.1.	Stroje s chladiči voda – vzduch	226
5.5.2.	Stroje s chladiči vzduch – vzduch	227
5.5.3.	Stroje s přívodem a odvodem chladiwa	228
5.6.	Volba vlastního nebo cizího chlazení	228
5.7.	Spolehlivost strojů s různým krytím a různým chlazením	228
6.	PŘÍSLUŠENSTVÍ VENTILAČNÍCH SYSTÉMŮ	230
6.1.	Cizí ventilátory (volba a provoz)	230
6.1.1.	Radiální ventilátory s lopatkami zahnutými dozadu ($\beta_2 < 90^\circ$)	234

6.1.2.	Radiální ventilátory s lopatkami zahnutými dopředu ($\beta_2 > 90^\circ$)	235
6.1.3.	Radiální ventilátory s rovnými lopatkami ($\beta_2 = 90^\circ$)	235
6.1.4.	Hluk průmyslových ventilátorů	235
6.2.	Chladiče voda – vzduch	236
6.2.1.	Konstrukční provedení chladičů voda – vzduch	236
6.2.2.	Provoz a údržba chladičů	238
6.2.3.	Objednávání chladičů	239
6.2.4.	Tepelný diagram chladiče	239
6.3.	Filtry	245
6.3.1.	Filtry na uhlíkový prach z kartáčů, vznikající ve stejnosměrných strojích	248
6.4.	Příslušenství ventilačních systémů strojů v nevybušném provedení	249
6.4.1.	Úvod do problematiky	249
6.4.2.	Přetlakové závěry Ex6	249
6.4.2.1.	Závěr s vnitřním dynamickým přetlakem	250
6.4.2.2.	Závěr s vnitřním statickým přetlakem	251
6.4.3.	Přístrojové vybavení	252
6.5.	Čidla průtoku chladiva	254
6.6.	Topná tělesa ve ventilačním systému elektrického stroje	255
7.	NÁVRH VHODNÝCH VENTILAČNÍCH SYSTÉMŮ PRO CHARAKTERISTICKÉ SKUPINY ELEKTRICKÝCH STROJŮ	258
7.1.	Ventilační systémy střídavých rychloběžných strojů	261
7.1.1.	Asynchronní stroje	262
7.1.2.	Synchronní stroje	264
7.2.	Ventilační systémy pomaloběžných střídavých elektrických strojů	265
7.3.	Ventilační systémy stejnosměrných strojů	269
7.4.	Ventilační systémy strojů do venkovního prostředí	271
7.5.	Ventilační systémy turbostrojů	278
7.6.	Ventilační systémy hydroalternátorů	280
8.	HLUK AERODYNAMICKÉHO PŮVODU	285
8.1.	Základní veličiny a pojmy	285
8.2.	Zdroje hluku	296
8.3.	Zdroje sířenového hluku	304
8.4.	Snižování úrovně hluku	311
9.	TEPELNÉ TŘÍDY IZOLACE, PŘÍPUSTNÁ OTEPLENÍ, STÁRNUTÍ IZOLACE	323
9.1.	Tepelné třídy izolace	323
9.2.	Tendence ve vývoji izolačních systémů pro vysoká napětí	326
9.3.	Životnost izolace	328
10.	SDÍLENÍ TEPLA V ELEKTRICKÝCH STROJÍCH A METODY VÝPOČTU OTEPLENÍ	330
10.1.	Úvod k problematice výpočtu oteplení elektrických strojů	330
10.2.	Odvod ztrátového tepla	331
10.2.1.	Vedení tepla v pevných látkách	331
10.2.2.	Sdílení tepla prouděním (konvekci)	333
10.2.3.	Přirozené proudění	336
10.2.4.	Sálání tepla	336
10.3.	Odvod tepla v neustáleném tepelném stavu	338
10.4.	Metoda tepelné sítě	341

11.	TEPELNÉ ODPORY	348
11.1.	Určení součinitelů tepelné vodivosti materiálů používaných při stavbě elektrických strojů točivých	348
11.2.	Určení součinitelů přestupu tepla z charakteristických chladicích ploch elektrických strojů	350
11.3.	Přestup tepla z povrchu čel statorového vinutí střídavých strojů	355
12.	VÝPOČET OTEPLENÍ ELEKTRICKÉHO STROJE	357
12.1.	Oteplení statoru střídavých strojů	357
12.1.1.	Konstanty výpočtu	359
12.1.2.	Vstupní údaje výpočtu	359
12.1.3.	Výpočet tepelných odporů	360
12.2.	Oteplení rotoru asynchronních strojů	363
12.2.1.	Oteplení vinutí rotoru nakrátko při rozběhu	369
12.3.	Oteplení budicího vinutí synchronních strojů s vyjádřenými póly	373
12.4.	Oteplení stejnosměrných strojů	377
12.4.1.	Oteplení vinutí	378
12.4.2.	Oteplení komutátoru	380
12.5.	Oteplení vinutí s přímým chlazením	384
12.5.1.	Zjednodušený výpočet oteplení vodiče s přímým chlazením	385
12.6.	Výpočet oteplení statorového vinutí stroje s chladičem vzduch—vzduch	387
12.7.	Problematika výpočtu přechodných stavů	388
12.8.	Přesnost tepelného výpočtu a vliv parametrů	389
13.	VENTILAČNÍ A TEPELNÁ MĚŘENÍ, MĚŘENÍ AERODYNAMICKÉHO HLUKU	391
13.1.	Ventilační měření na zkušebně a v provozu	391
13.2.	Zjišťování a odstraňování nejběžnějších závad ve ventilačních systémech elektrických strojů	397
13.3.	Měření ventilačních ztrát	399
13.3.1.	Doběhová metoda podle Reinhardta	399
13.3.2.	Doběhová metoda s použitím číslicového počítače	400
13.3.3.	Metoda měření mechanických ztrát při několika úhlových rychlostech	401
13.4.	Oteplovací zkoušky a stanovení mezního tepelného zatížení stroje	401
13.4.1.	Oteplovací zkoušky	401
13.4.2.	Stanovení mezního tepelného zatížení stroje	403
13.5.	Náhradní oteplovací zkoušky střídavých strojů s velkými výkony	405
13.5.1.	Princip superpozice ztrát a oteplení	405
13.5.2.	Náhradní oteplovací zkoušky vhodné pro synchronní stroje	406
13.5.3.	Zjednodušené metody náhradních oteplovacích zkoušek pro synchronní stroje	408
13.5.4.	Zavedení korekce na zvětšení velikosti ztrát ve vinutí statoru	408
13.5.5.	Náhradní oteplovací zkoušky asynchronních strojů	410
13.6.	Čidla pro měření teplot	411
13.7.	Měření a vyhodnocování hladiny hluku	413
14.	VÝVOJ A VÝZKUM CHLAZENÍ, VENTILACE A HLUKU ELEKTRICKÝCH STROJŮ	417
14.1.	Měření na skutečných strojích	417
14.2.	Měření na modelech	419
	Přehled termofyzikálních vlastností některých materiálů	423
	Seznam literatury	428
	Rejstřík	435