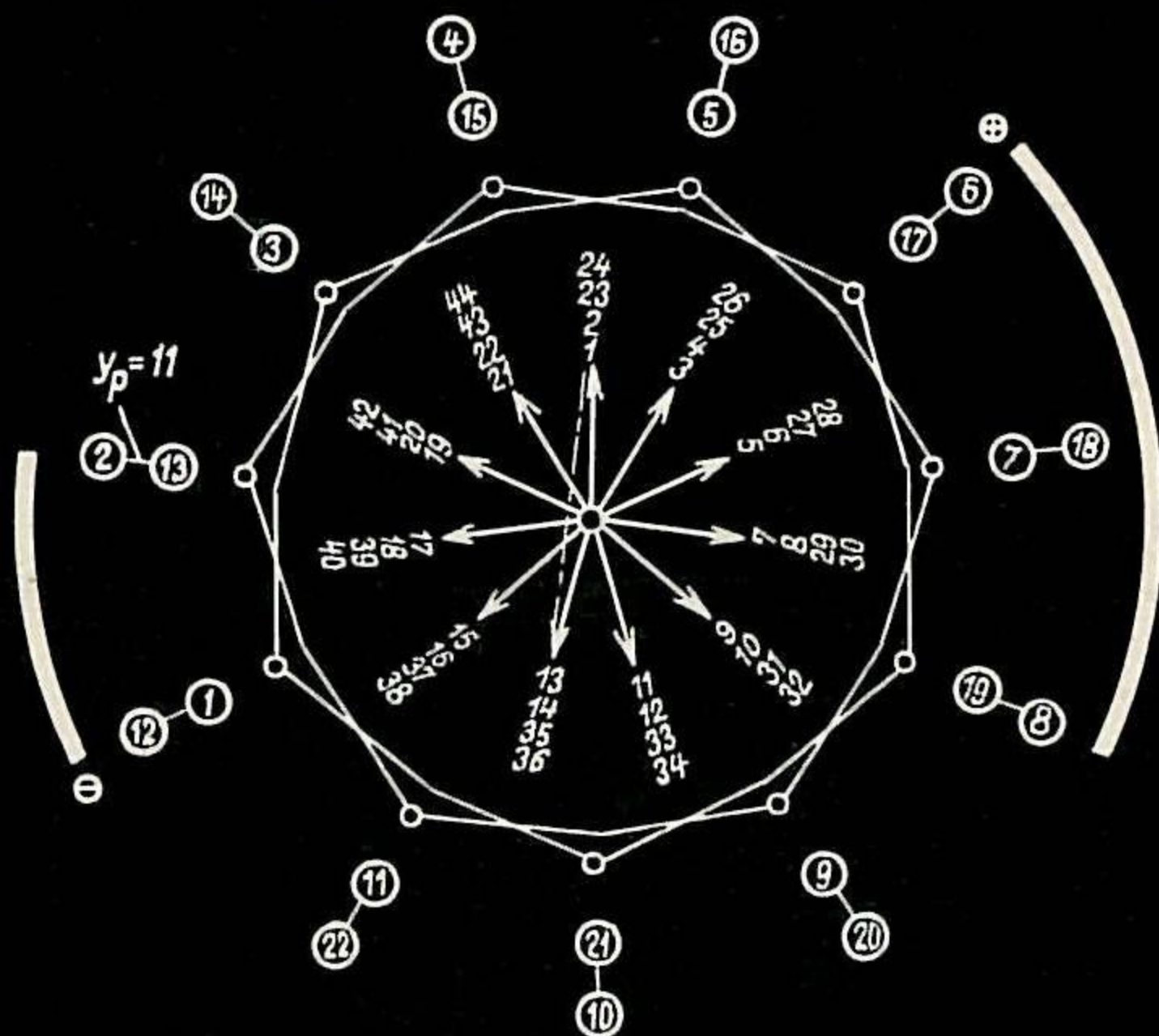


Elektrické stroje a přístroje

III. Navrhování elektrických strojů točivých

RUDOLF MRAVEC



SNTL

ING. RUDOLF MRAVEC

ELEKTRICKÉ STROJE A PŘÍSTROJE

III. Navrhování elektrických strojů točivých

*Přeložil a upravil
doc. Ing. Vladimír Suchánek, CSc.*

Třetí, nezměněné vydání

*Schválilo ministerstvo školství České socialistické republiky
dne 15. srpna 1975, č. j. 22 185/75-211
jako učební text pro IV. ročník SPŠE studijního oboru 26-61-6
Zařízení silnoproudé elektrotechniky*

PRAHA 1986

**SNTL – NAKLADATELSTVÍ
TECHNICKÉ LITERATURY**

2 - 901.082 / 3

MZK-UK Brno



2619921189

Kniha obsahuje návrhy a konstrukce elektrických strojů točivých (asynchronních, stejnosměrných a synchronních), včetně pokynů pro volbu materiálů, chlazení a návrhu mechanické části.

Je určena žákům 4. ročníků středních průmyslových škol elektrotechnických.

Redakce elektrotechnické literatury
Hlavní redaktor Ing. Josef Říha
Odpovědný redaktor Ing. Rostislav Zeman

© Ing. Rudolf Mravec, 1975
Translation © doc. Ing. Vladimír Suchánek, CSc., 1977



OBSAH

1.	Úvod do návrhu elektrických strojů točivých	9
1.1.	Všeobecné zásady návrhu	9
1.2.	Jmenovité veličiny elektrických strojů	10
1.3.	Materiály pro výrobu elektrických strojů točivých	11
1.3.1.	Rozdělení	11
1.3.2.	Vodiče	11
1.3.3.	Magnetické materiály	12
1.3.4.	Izolační materiály	14
1.3.5.	Konstrukční materiály	14
1.3.6.	Označení materiálů ve výrobních podkladech	15
1.3.7.	Rozměrové tabulky vodičů pro vinutí	24
1.3.8.	Tabulky charakteristických vlastností používaných materiálů	24
1.3.9.	Kontrolní otázky	24
1.4.	Chlazení elektrických strojů	32
1.4.1.	Základní údaje	32
1.4.2.	Trvalé zatížení	32
1.4.3.	Krátkodobý chod	41
1.4.4.	Průběh oteplování a ochlazování	42
1.4.5.	Časový výkon	45
1.4.6.	Přerušovaný chod	47
1.4.7.	Přestup tepla materiálem, ve kterém nevznikají ztráty	48
1.4.8.	Náhradní tepelná vodivost	51
1.4.9.	Jednosměrné proudění v aktivním materiálu	52
1.4.10.	Dovolené oteplení	56
1.4.11.	Způsoby chlazení točivých strojů	57
1.4.12.	Návrh ventilátoru pro točivý stroj	59
1.4.13.	Kontrolní otázky	61
1.5.	Mechanický návrh elektrických strojů točivých	63
1.5.1.	Návrh hřídele	63
1.5.2.	Návrh ložiska	68
1.5.3.	Závěsná oka	70
1.5.4.	Mechanické namáhání klínů rotorových drážek	70
1.5.5.	Návrh bandáže pro rotorové vinutí	71

1.5.6.	Konstrukční vypracování elektrických strojů točivých	73
1.5.7.	Kontrolní otázky	74
2.	Vinutí elektrických strojů točivých	79
2.1.	Stejnoseměrná vinutí	79
2.1.1.	Základní pojmy	79
2.1.2.	Smyčkové (paralelní) vinutí	82
2.1.3.	Smyčkové vinutí s větším počtem lamel na drážku	86
2.1.4.	Vyrovňovací spojky	91
2.1.5.	Vlnové (sériové) vinutí	92
2.1.6.	Vlnové vinutí s několika lamelami na drážku	95
2.1.7.	Sériověparalelní vinutí	98
2.1.8.	Několikanásobné paralelní vinutí	102
2.1.9.	Kontrolní otázky	105
2.2.	Střídavá vinutí	106
2.2.1.	Základní pojmy	106
2.2.2.	Vyšetřování průběhu magnetického pole	107
2.2.3.	Görgesův diagram	110
2.2.4.	Jednovrstvová vinutí	112
2.2.5.	Dvouvrstvová vinutí	114
2.2.5.1.	Základní pojmy	114
2.2.5.2.	Görgesův diagram dvouvrstvových vinutí	116
2.2.5.3.	Spojování dvouvrstvových vinutí	116
2.2.5.4.	Paralelní větve	118
2.2.5.5.	Tyčové vinutí	118
2.2.6.	Zlomková vinutí	118
2.2.6.1.	Základní pojmy	118
2.2.6.2.	Tingleyovo schéma	120
2.2.6.3.	Fázorový diagram drážkových napětí	123
2.2.6.4.	Dvouvrstvové zlomkové vinutí	124
2.2.7.	Činitel vinutí	127
2.2.7.1.	Význam	127
2.2.7.2.	Grafické určení činitele vinutí k_p	128
2.2.7.3.	Určení činitele vinutí k_p z Tingleyova schématu	128
2.2.7.4.	Matematické řešení	129
2.2.8.	Činitel tvaru	132
2.2.9.	Klec jako mnohofázové vinutí	133
2.2.10.	Harmonická analýza	134
2.2.11.	Vliv vyšších harmonických	136
2.2.12.	Diferenční rozptyl	138
2.2.13.	Kontrolní otázky	142
3.	Postupy při návrhu točivých elektrických strojů	143
3.1.	Návrh indukčního motoru	143
3.1.1.	Základní údaje	143
3.1.2.	Určení hlavních rozměrů motoru s kotvou nakrátko	143
3.1.3.	Kontrola návrhu	164

3.1.3.1.	Magnetizační proud	164
3.1.3.2.	Ztrátový proud	173
3.1.3.3.	Výpočet odporu	175
3.1.3.4.	Výpočet reaktance	176
3.1.3.5.	Impedance	183
3.1.3.6.	Proud nakrátko	183
3.1.3.7.	Kruhový diagram	184
3.1.3.8.	Ztráty	184
3.1.3.9.	Účinnost	185
3.1.4.	Návrh ventilátoru	185
3.1.5.	Výpočet oteplení	185
3.1.5.1.	Statorové vinutí	185
3.1.5.2.	Statorový svazek	186
3.1.5.3.	Rotorové kruhy	186
3.1.5.4.	Oteplení vlastního proudu vzduchu	187
3.1.5.5.	Výsledné oteplení vzhledem k okolí	188
3.1.6.	Mechanický návrh a jeho kontrola	189
3.2.	Návrh kroužkového motoru	189
3.2.1.	Rotorové napětí	189
3.2.2.	Počet drážek na pól a fázi	189
3.2.3.	Počet závitů v sérii	190
3.2.4.	Rotorový proud	190
3.2.5.	Průřez rotorového vinutí	190
3.2.6.	Rotorová drážka	191
3.2.7.	Kroužky	192
3.2.8.	Kartáče	193
3.2.9.	Držáky kartáčů	194
3.2.10.	Klíň rotorové drážky	194
3.2.11.	Tvar rotorové ořevky	194
3.2.12.	Bandáž čel rotorového vinutí	194
3.2.13.	Kontrola návrhu	194
3.2.14.	Ztráty kroužkového motoru	194
3.3.	Návrh stejnosměrného stroje	195
3.3.1.	Základní údaje	195
3.3.2.	Vnitřní výkon	196
3.3.3.	Jmenovitý proud	198
3.3.4.	Proud kotvy	199
3.3.5.	Průměr kotvy	200
3.3.6.	Počet pólů	200
3.3.7.	Počet závitů v sérii	201
3.3.8.	Počet drážek	201
3.3.9.	Počet lamel	201
3.3.10.	Volba vinutí kotvy	202
3.3.11.	Počet vodičů v drážce	202
3.3.12.	Napětí indukované v kotvě	203
3.3.13.	Magnetický tok pólu	203
3.3.14.	Efektivní délka železa (kotvy)	203
3.3.15.	Skutečná délka železa	204
3.3.16.	Průřez vinutí kotvy	204
3.3.17.	Návrh drážky	204
3.3.18.	Jho rotoru	207

3.3.19.	Vzduchová mezera	207
3.3.20.	Jho hlavního pólu	207
3.3.21.	Jho statoru	209
3.3.22.	Magnetomotorické napětí (buzení) pro jednu pólovou dvojici	209
3.3.23.	Charakteristika naprázdno	211
3.3.24.	Budící vinutí	211
3.3.25.	Uspořádání budícího vinutí	213
3.3.26.	Pomocný pól	214
3.3.27.	Komutátor	215
3.3.28.	Vyložení čel vinutí kotvy	219
3.3.29.	Ztráty	220
3.3.30.	Účinnost	222
3.3.31.	Oteplení	222
3.3.32.	Ventilátor	223
3.3.33.	Konstrukční části	223
3.3.34.	Sestava	223
3.4.	Návrh synchronního stroje	224
3.4.1.	Základní údaje	224
3.4.2.	Určení hlavních rozměrů	224
	Literatura	236

1. ÚVOD DO NÁVRHU ELEKTRICKÝCH STROJŮ TOČIVÝCH

1.1. VŠEOBECNÉ ZÁSADY NÁVRHU

Přestože jsou dnes všechny teoretické vztahy z oblasti elektrických strojů točivých velmi dobře známé, neexistují žádné základní rovnice, z nichž by bylo možné určit exaktním způsobem hlavní rozměry strojů jednoduchým dosazením požadovaných parametrů.

Obecně je možné každý elektrický točivý stroj navrhnout s libovolným průměrem, nebo naopak s libovolnou délkou aktivního železa.

Dobře navržený stroj je dnes výsledkem dlouholetého zdokonalování už vyrobených typů a splňuje celou řadu často i protichůdných požadavků (malá spotřeba materiálu, nízká cena, malá pracnost, předepsané elektrické a mechanické vlastnosti, malý odpad při výrobě apod.). Návrh motoru je vázán na výrobní možnosti závodu, rozměry použitých materiálů, podnikovými i celostátními normami, existujícími výrobními přípravky, požadovanými montážními rozměry stroje apod. Mezi nejtěžší výpočtářské práce patří návrh řady indukčních motorů (motory různých výkonů, ale stejné konstrukce, vyráběné stejnou technologií).

Snahou je zavést co nejmenší počet typů při zaručené hospodárné volbě výkonu. Řady motorů se normalizují i v mezinárodním měřítku (IEC). Těžkosti při této normalizaci způsobuje rychlé zmenšování rozměrů používáním modernějších izolací. Přísná normalizace, spojená s nákladnými investicemi vloženými do přípravy výroby nové série, byla často brzdou dalšího pokroku v rozvoji nové technologie. Při návrhu řady motorů je třeba z nespočetného množství možných variant vybrat ty, které jsou nejvhodnější. Pro tuto úmornou práci se v poslední době používají počítače, které mohou vhodné řešení vybrat z většího množství používaných variant, než by byl schopen udělat výpočtář.

V SSSR byla v roce 1956 přepočítána řada indukčních motorů o výkonu od 100 do 1 000 kW a v roce 1957 na základě získaných zkušeností nová řada od 0,6 kW do 100 kW. Byl při tom použit počítač M3, který měl 770 elektronek, 3 000 kuproxidových diod a za sekundu byl schopen vykonat 1 200 početních operací. Práci, kterou je výpočtář schopen vykonat za 16 let, vykonal stroj za 36 hodin.

Dnes je používání počítačů při návrhu elektrických strojů téměř samozřejmostí.

Potom je ale přirozené, že postup návrhu, jak je uveden u jednotlivých strojů v této učebnici, je značně odlišný od postupu, jaký se volí při návrhu stroje pomocí počítače. Uvedené návrhy je třeba chápat jako příležitost k systematickému opakování základních vztahů a k ověření vlivu jednotlivých veličin na základní vlastnosti stroje.

V posledním čase se čím dál tím více uskutečňuje i projektování strojů na široké mezinárodní úrovni. Příkladem je nová řada trojfázových indukčních motorů s kotvou nakrátko typu M4A, která je výsledkem spolupráce našich a sovětských odborníků (VÚES Brno a VNIIEM Moskva). Mnohé motory získaly zlatou medaili na XIV. mezinárodním strojírenském veletrhu v Brně a na elektrotechnické výstavě v Moskvě 1972.

Úplný návrh elektrického stroje nebo přístroje se skládá z těchto částečných návrhů:

1. Návrh elektrického obvodu.
2. Návrh magnetického obvodu.
3. Návrh izolace.
4. Návrh tepelný.
5. Návrh mechanický.
6. Návrh konstrukce s ohledem na technologii výroby.

Ani jeden z těchto návrhů není možné vypracovat samostatně, protože všechny spolu úzce souvisejí.

1.2. JMENOVITÉ VELIČINY ELEKTRICKÝCH STROJŮ

Jmenovité napětí je napětí, na které je elektrický stroj konstruován a které je uvedeno na štítku.

Jmenovité napětí zdrojů a spotřebičů určuje ČSN 340020 v souladu s doporučením RVHP a IEC.

U trojfázové soustavy se jmenovitým napětím rozumí sdružené napětí.

Jmenovité proudy přístrojů a spojovacích částí, které se zapojují v sérii do elektrických obvodů, určuje ČSN 340030.

Jmenovité hodnoty výkonů pro jednotlivé stroje jsou uvedeny v příslušných kmenových normách.

Jmenovitým výkonem se podle ČSN 350000 rozumí

- a) u dynam elektrický výkon na svorkách (W, kW, MW);
- b) u alternátorů zdánlivý elektrický výkon na svorkách (VA, kVA, MVA) a činný elektrický výkon na svorkách (W, kW, MW);
- c) u motorů mechanický výkon na hřídeli (W, kW, MW);

d) u synchronních kompenzátorů jalový výkon na svorkách (kVAr, MVAr).

Základní norma ČSN 350000 doporučuje použít čísla a jejich dekadické násobky z řady uvedené v ČSN 010201. Tato norma uvádí tzv. vyvolená čísla ve čtyřech základních geometrických řadách s těmito kvocienty:

řada R 5

$$\text{kvocient } \sqrt[5]{10}$$

řada R 10

$$\text{kvocient } \sqrt[10]{10}$$

řada R 20

$$\text{kvocient } \sqrt[20]{10}$$

řada R 40

$$\text{kvocient } \sqrt[40]{10}$$

1.3. MATERIÁLY PRO VÝROBU ELEKTRICKÝCH STROJŮ TOČIVÝCH

1.3.1. Rozdělení

Při stavbě elektrických strojů se používají tři základní druhy materiálů:

1. Aktivní materiály

- a) vodiče — pro výrobu vinutí a různých částí elektrického obvodu (lamely komutátoru, sběrací ústrojí, svorky apod.);
- b) magnetické materiály — pro výrobu magnetických obvodů.

2. Izolační materiály

- a) tuhé izolanty — izolování vodičů mezi sebou a proti železu;
- b) kapalné izolanty — k impregnování a kompaundování.

3. Konstrukční materiály.

1.3.2. Vodiče

Nejběžnějším vodičem je elektrovodná měď (E Cu — ČSN 423001) s čistotou 99,9 %.

Pro některé účely musí mít měď speciální vlastnosti. Proto se leguje, a to obvykle stříbrem, v SSSR i kadmíem.

Nedostatek mědi je dnes světovým problémem. Hledají se tedy náhradní materiály; nejčastější náhradou mědi je elektrovodný hliník (E Al — ČSN 424004) s čistotou 99,5 %, v některých případech i pozinkované nebo kadmiované železo.

Náhrada mědi hliníkem při stavbě elektrických strojů nebyla tak snadná jako při stavbě elektrických vedení. O náhradě mědi hliníkem pojednává ČSN 340290 — Předpisy pro používání hliníku v elektrotechnice.

1.3.3. Magnetické materiály

Magnetické materiály dělíme na magneticky tvrdé, měkké a speciální.

1. Magneticky tvrdé materiály se používají pro výrobu stálých (permanentních) magnetů. Jsou to jednak kalitelné ocele s obsahem asi 1 % uhlíku a asi 5 až 6 % wolframu, jednak speciální slitiny (W, Co, Mo) různých obchodních značek jako např. Alnico, které svými vlastnostmi značně převyšují všechny druhy kalitelných ocelí. Dnes se zavádějí i nové výrobky práškové metalurgie.

2. Magneticky měkké materiály se používají pro výrobu magnetických obvodů, kterými prochází střídavý magnetický tok. Vyznačují se malými hysterelními ztrátami a malými ztrátami způsobenými vířivými proudy. Jsou to ocelové plechy se zvětšeným obsahem křemíku.

Dnes používáme tři druhy plechů pro elektrotechniku:

1. Neorientované plechy

a) válcované za tepla (klasické) — nejčastěji používané;
b) válcované za studena — jsou to nejnovější druhy vytlačující postupně plechy válcované za tepla.

2. Orientované plechy, válcované za studena, s minimálními ztrátami, ale s rozdílnými magnetickými vlastnostmi ve směru válcování a ve směru kolmém na válcování.

Kromě jiných příznivých vlastností se vyznačují velmi malými jmenovitými měrnými ztrátami $\Delta p_{1,0}$.

Orientované plechy jsou obzvláště výhodné při konstrukci velkých transformátorů. Přispívají ke zmenšení jejich ztrát naprázdno, a tak ke značnému zlepšení hospodářských výsledků v energetice.

Orientované plechy se u nás používají především ke stavbě velkých dvoupólových strojů, kde lze poměrně snadno dosáhnout toho, aby směr magnetického toku souhlasil se směrem válcování. V daném objemu se tím zvětší výkon až o 25 %.

Použitím orientovaných plechů se může zvětšit magnetická indukce v železe asi o 15 %, činitel plnění aktivního železa se zvětší asi o 5 %.

Tabulka 1. Plechy pro elektrotechniku

Značka jakosti	Tloušťka mm	Měrné ztráty W/kg			Činitel plnění k_{Fe}	Měrná hmotnost g/cm ³		Výrobní rozměry
		$\Delta p_{1,0}$	$\Delta p_{1,5}$	$\Delta p_{1,7}$		nemořené	mořené	
Plechý válcované za tepla								
Et 3,6	0,50 1,00	3,6 6,3	8,6 10,0		0,93	7,80	7,85	Tabule 1000 × 2000 mm
Et 3,0	0,50 1,00	3,0 5,3	7,3 12,8			7,75	7,80	
Et 2,6	0,50 1,00	2,6 4,6	6,3 11,0			7,60	7,65	
Et 2,3	0,50	2,3	5,6					
Et 2,0	0,50	2,0	4,9					
Et 1,8	0,50	1,8	4,4					
Et 1,6	0,35 0,50	1,6 1,6	3,8 4,0		0,90 až 0,92 0,92 až 0,94	— —	7,60	Tabule 750 × 2000 mm
Et 1,4	0,35 0,50	1,4 1,4	3,4 3,5		0,90 až 0,92 0,92 až 0,94	— —		
Et 1,3	0,35 0,50	1,3 1,3	3,2 3,3		0,90 až 0,92 0,92 až 0,94	— —		
Et 1,2	0,35	1,2	2,9			—	7,55	
Plechý válcované za studena								
Eo 11	0,35	0,52	1,12	1,75	0,97 pro 1 MPa 0,95 pro 0,5 MPa	7,65		Pásky ve svitcích šířky 750 mm
Eo 12		0,56	1,23	1,90				
Eo 13		0,63	1,36	2,10				
Eo 15		0,72	1,55	2,40				
Eo 17		0,80	1,75	2,70				
Výroba ještě jakostnějších plechů se připravuje								

hmotnost železa se zmenší o 10 %, hmotnost vinutí asi o 10 %. Současně se zmenší ztráty v železe průměrně o 35 % a ztráty ve vinutí asi o 20 %.

Zvýšené náklady na stavbu stroje se vrátí zmenšením ztrát asi za 5 let.

Izolace orientovaných plechů bývá keramická, nejčastěji křemičitá, která umožní potřebné regenerační žíhání během zpracování ve vodíkové atmosféře při teplotě až 800 °C. Vyznačuje se poměrně velkým elektrickým odporem, který je důležitý pro zmenšení ztrát vířivými proudy.

Přehled vlastností a rozměrů u nás vyráběných plechů Et (t — válcované za tepla) podle ČSN 420230 a ČSN 425305 a orientovaných plechů Eo (orientované) podle ČSN 420231 a 426341 je v tab.1.

Poznámka. Číslo za značkou plechu Et, popř. Eo udává jmenovité měrné ztráty $\Delta p_{1,0}$.

3. Speciální materiály se vyznačují různými speciálními vlastnostmi, např. stálou permeabilitou, pravoúhlou hysterezní smyčkou apod.

Cena magnetického materiálu tvoří podstatnou část materiálových nákladů (u strojů bez komutátoru až polovinu). Proto je třeba jeho volbě věnovat zvýšenou pozornost.

1.3.4. Izolační materiály

Podle současného stavu výrobní techniky je větším problémem zhotovení dokonalé izolace elektrického stroje vn, než jeho vlastní stavba. Od izolace se vyžaduje co největší elektrická pevnost, tepelná kapacita, tepelná vodivost, mechanická pevnost, pružnost, odolnost proti působení olejů a odolnost proti vnikání vody.

Rozdělení, vlastnosti a použití izolačních materiálů jsou předmětem elektrotechnologie.

1.3.5. Konstrukční materiály

Běžně se používají tyto konstrukční materiály:

1. Válcované ocele (nádoby transformátorů, ložiskové štíty, mechanické části přístrojů).

2. Kalitelné ocele na hřídele (pro rotory turboalternátorů legované chromem, niklem, vanadiem).

3. Nemagnetické ocele legované niklem a manganem (na stahovací obruče turborotorů).

4. Šedá litina (na kostry točivých strojů).

5. Ocelolitina (magnetické póly synchronních strojů).

6. Hliníkové slitiny tvárné (dural) nebo slévateľné; vynikají malou hmotností.

7. Siluminy (87 % Al, 13 % Si), vhodné pro tenkostěnné odlitky, např. lopatky ventilátorů apod.

8. Elektronky (10 % Mg, 3 % Zn, Al) představují nejlépe slitiny vůbec, které se používají jen v ojedinělých případech.

9. Bronzy (Cu + Sn) s různými přísadami (Al, Mn, Mg, Fe, Ni, Pb). Bronzy mohou být válcované nebo slévateľné (fosforový, cínový); používají se na ložiska.

10. Izolanty se používají jako konstrukční materiál při stavbě elektrických přístrojů.

11. Plastické hmoty — pro některé části moderně konstruovaných strojů.

1.3.6. Označení materiálů ve výrobních podkladech

Vodiče. Předpisy pro vodiče určené pro vinutí elektrických strojů jsou uvedeny v normách skupiny ČSN 3473. . .

Všechny vlastnosti a rozměry vodičů pro vinutí jsou soustředěny v katalogu číslo 20.00 — Vodiče pro vinutí — soubor, vydaný ZSE (Závody silnoproudé elektrotechniky).

Jednotlivé druhy vodičů se označují značkou, která se skládá z těchto údajů:

materiál jádra (Cu nebo Al)

tloušťka izolace

druh izolace

rozměry jádra

Značky pro druh izolace:

a) Izolační laky:

všeobecná značka	L
polyesterimidový	I
polyvinylformalový	F
samolepivý	C
polyamidový	P
silikonový	S
tereftalátový	T
polyuretanový	U
epoxidový	E

b) Vlákenná a pásková izolace:

opředení hedvábím	H
opředení bavlnou, umělou přízí	B

opředení polyamidovou přízí	Pa
opředení skleněnou přízí a lakované (za značkou K se uvede značka laku)	K . . .
ovinití papírovou páskou	P
jednoduché opletení bavlnou nebo umělou přízí	xB
jednoduché ovinití papírem a jedno opředení bavlnou, umělou přízí	PB

U kombinované izolace se uvádějí jednotlivé značky vedle sebe, počítaje vnitřní vrstvou.

Příklad

- 2 B × B dvojitě opředení bavlnou a na něm jednoduché opletení bavlnou;
2 PB dvojnásobné ovinití papírem a na něm jednoduché opředení bavlnou.

Měděné a hliníkové pásy se vyrábějí v těchto izolačních kombinacích:

- 2 B pásy dvojnásobně protisměrně opředené bavlnou nebo umělou přízí;
B × B pásy jednou opředené a jednou opletené bavlnou nebo umělou přízí;
2B × B pásy dvojnásobně protisměrně opředené a jednou opletené bavlnou nebo umělou přízí;
2 KT pásy podlepené, dvojnásobně protisměrně opředené skleněnou přízí a lakované tereftalátovým lakem;
2 KB pásy dvojnásobně protisměrně opředené skleněnou přízí a jednoduše opředené bavlnou nebo umělou přízí;
n PB pásy n-násobně ovinité páskou z neimpregnovaného papíru a jedduše opředené bavlnou nebo umělou přízí s předepsaným izolačním přírůstkem;
n P pásy n-násobně ovinité páskou z neimpregnovaného papíru s předepsaným izolačním přírůstkem.

Tloušťka izolace. Jednoduchá tloušťka lakovaného, opředěného a opleteného vodiče se zvláště neoznačuje.

Zesílení izolace lakovaného vodiče a dvojitá izolace opředěného a opleteného vodiče se označují číslicí 2 před značkou izolace.

Izolace ovinitím je obvykle z několika vrstev. Rozměr této izolace se udává číselnou velikostí přírůstku.

Izolační přírůstky jsou uvedeny v tabulkách příslušných vodičů (katalog ZSE č 20.00).

Podle obr. 1 je izolační přírůstek dán rozdílem:

u drátu

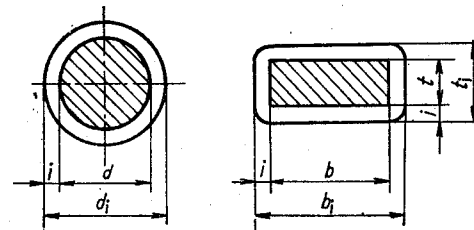
$$2i = d_1 - d$$

u pásu

$$2i = t_1 - t$$

kde i je tloušťka izolace, důležitá pro tepelné výpočty.

Rozměry jádra. Dráty se označují jmenovitým průměrem, pásy součinem šířka × tloušťka ($b \times t$).



Obr. 1. Rozměry izolovaných vodičů

Příklad označení

- Lakovaný drát Cu T 0,40 ČSN 34 7336
Pás Al 2 KT 4,4 × 0,8 ČSN 34 7306

Ve školních příkladech a výkresech budou rozměry vodičů udávány zlomkem, jehož číselník udává rozměr jádra a jmenovatel vnější rozměr vodiče i s izolací.

Rozměry, předepsané vlastnosti a značení izolantů jsou v normách skupiny ČSN 34 65 . . .

Plech. Plechy pro elektrotechniku válcované za tepla (označení Et) a plechy orientované (Eo) se udávají značkou plechu, jmenovitými měrnými ztrátami, tloušťkou a rozměry tabule nebo pásu a číslem rozměrové normy.

Příklad

- Et 3,6 - 0,5 × 1000 × 2000 ČSN 42 5305

Poznámka. Původní označení plechů značkami DN — dynamové plechy a TN — transformátorové plechy se už nepoužívá.

Konstrukční materiál. V označení konstrukčního materiálu je třeba kromě běžných údajů podle potřeby udat i značku jakosti (tepelného zpracování).

Příklad

- Válcovaná plochá ocel □ 20 × 10 ČSN 1014/III — 11.371.0

Číselné značky materiálů jsou ve strojnických normách a materiálových listech.



Tabulka 2. Izolační přírůstky

Jmenovitý průměr mm	Průřez mm ²	Izolační			
		Cu T Cu I Al T	Cu 2T Cu 2I	Cu LH	Cu L2H
0,050	0,00196	0,015	0,024	—	0,088
0,056	0,00246	0,020	0,032	—	0,091
0,063	0,00317				
0,071	0,00396				
0,080	0,00503				
0,090	0,00636				
0,100	0,00785				0,093
0,112	0,00985	0,027	0,044	0,069	0,099
0,125	0,0123				
0,132	0,0137			×	
0,140	0,0154			×	
0,150	0,0177			×	
0,160	0,0201				
0,170	0,0227	0,035	0,056	0,070 ×	0,100
0,180	0,0255			×	
0,190	0,0284				
0,200	0,0324				
0,212	0,0353				0,075 ×
0,224	0,0394		×		
0,236	0,0437		×		
0,250	0,0491				
0,265	0,0552	0,045	0,070	0,078 ×	0,107
0,280	0,0616			×	
0,300	0,0707				
0,315	0,0779			0,085	0,115
0,335	0,0881		×		
0,355	0,0990		×		
0,375	0,1110				
0,400	0,1260				
0,425	0,142	0,055	0,086	0,087 ×	0,132
0,450	0,159				
0,475	0,177			0,092 ×	
0,500	0,196				

kruhových vodičů

přírůstky [mm] pro izolaci

Cu LB	Cu L2B	Cu 2H	Cu 2B	Cu 2KS
—	—	—	—	—
		0,075		
		0,078		
		0,080		
		0,083 0,081 0,079 0,080		
		0,085		
0,163 ×	0,275 ×		0,170	
×	×			
0,165 ×				
	×			
0,167 ×	0,277 ×	0,090	0,175	
			0,185	
×	×			
0,200			0,215	

Tabuľka 2. —

Jmenovitý průměr mm	Průřez mm ²	Izolační			
		Cu T Cu I Al T	Cu 2T Cu 2I	Cu LH	Cu L2H
0,530	0,221			0,100 ×	0,140
0,560	0,246			×	
0,600	0,283				
0,630	0,312				
0,670	0,353	0,070	0,106	0,105 ×	0,145
0,710	0,396			0,115	0,155
0,750	0,442				
0,800	0,503				
0,850	0,567				
0,900	0,636				
0,950	0,709				
1,000	0,785				
1,060	0,882	0,095	0,140	—	—
1,120	0,985				
1,180	1,094				
1,250	1,227				
1,320	1,369				
1,400	1,539				
1,500	1,767				
1,600	2,011				
1,700	2,270	0,120	0,180		
1,800	2,545				
1,900	2,835				
2 000	3,142				
2,120	3,530				
2,240	3,941				
2,360	4,374				
2,500	4,909				
2,650	5,515	0,150	0,240		
2,800	6,158				
3,000	7,069				
3,150	7,793				

Vodič CU I jen od průměru 0,100 do průměru 1,500 mm
 Vodič Cu2I jen od průměru 0,100 do průměru 1,500 mm
 Vodič Al T jen od průměru 0,500 mm
 Rozměry označené × se nedoporučují

pokračování 1

přírůstky [mm] pro izolaci				
Cu LB	Cu L2B	Cu 2H	Cu 2B	Cu 2KS
×	0,290 ×			
×	×			
0,205 ×	0,290 ×	—	0,220	0,240
	0,295			
	0,330			
0,230				
0,235	0,335		0,270	
				0,250
				0,270
0,285	0,385			
0,290	0,390		0,275	0,300
	0,420			
			0,325	
0,397	0,500		0,335	0,365
			0,385	

Třídy teplotní stálosti: Cu T, Cu 2T, Al T třída B
 Cu I, Cu 2I třída F
 Cu 2B třída A
 Cu 2KS třída H
 Cu LH, Cu L2H, Cu LB, Cu L2B impregnované třída A
 neimpregnované třída Y

Tabulka 3. Průřezy pásů

Šířka [mm]	Jmenovitá											
	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
	Průřez [mm²] s ohledem											
1,4	1,04	1,21	1,26	1,40	1,47	1,61	1,75					
1,6	1,20	1,36	1,46	1,62	1,71	1,87	2,03	2,09	2,25			
1,8	1,36	1,54	1,66	1,84	1,95	2,13	2,31	2,39	2,57	2,75	2,93	
2,0	1,52	1,72	1,86	2,06	2,19	2,39	2,59	2,69	2,89	3,09	3,29	3,38
2,2	1,68	1,9	2,06	2,28	2,43	2,65	2,87	2,99	3,21	3,43	3,65	3,76
2,5	1,92	2,17	2,36	2,61	2,79	3,04	3,29	3,44	3,69	3,94	4,19	4,33
2,8	2,16	2,44	2,66	2,94	3,15	3,43	3,71	3,89	4,17	4,45	4,73	4,90
3,0	2,32	2,62	2,86	3,16	3,39	3,69	3,99	4,19	4,49	4,79	5,09	5,28
3,2	2,48	2,80	3,06	3,38	3,63	3,95	4,27	4,49	4,81	5,13	5,45	5,66
3,5	2,72	3,07	3,36	3,71	3,99	4,34	4,69	4,94	5,29	5,64	5,99	6,23
4,0	3,12	3,52	3,86	4,26	4,59	4,99	5,39	5,69	6,09	6,49	6,89	7,18
4,5	3,52	3,97	4,36	4,81	5,19	5,64	6,09	6,44	6,89	7,34	7,79	8,13
5,0	3,92	4,42	4,86	5,36	5,79	6,29	6,79	7,19	7,69	8,19	8,69	9,08
5,5	4,32	4,87	5,36	5,91	6,39	6,94	7,49	7,94	8,49	9,04	9,59	10,03
6,0	4,72	5,32	5,86	6,46	6,99	7,59	8,19	8,69	9,29	9,89	10,49	10,98
6,5		5,77	6,36	7,01	7,59	8,24	8,89	9,44	10,09	10,74	11,39	11,93
7,0		6,22	6,86	7,56	8,19	8,89	9,99	10,19	10,89	11,59	12,29	12,88
8,0			7,86	8,66	9,39	10,19	10,99	11,69	12,49	13,29	14,09	14,78
9,0					10,59	11,49	12,39	13,19	14,09	14,99	15,89	16,68
10,0						12,79	13,79	14,69	15,69	16,69	17,69	18,58
11,0							15,19	16,19	17,29	18,39	19,49	20,48
12,0								17,69	18,89	20,09	21,29	22,38
13,0									21,79	23,09	23,28	
14,0										24,89	26,18	
15,0											28,08	
16,0												
18,0												
20,0												

z mědi a z hliníku

tloušťka t [mm]												
2,0	2,2	2,5	2,8	3,0	3,2	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	
na zaoblení hran												
3,58												
3,98	4,42											
8,08	5,08	5,70										
5,18	5,74	6,45	7,29									
5,58	6,18	6,95	7,85	8,45								
5,98	6,62	7,45	8,41	9,05	9,38							
6,58	7,28	8,20	9,25	9,95	10,34	11,39						
7,58	8,38	9,45	10,65	11,45	11,94	13,14	15,14					
8,58	9,48	10,70	12,05	12,95	13,54	14,89	17,14	19,01				
9,58	10,58	11,95	13,45	14,45	15,14	16,64	19,14	21,26	23,76			
10,58	11,68	13,20	14,85	15,95	16,74	18,39	21,14	23,51	26,26	29,01		
11,58	12,78	14,45	16,25	17,45	18,34	20,14	23,14	25,76	28,76	31,76	34,32	
12,58	13,88	15,70	17,65	18,95	19,94	21,89	25,14	28,01	31,26	34,51	37,32	
13,58	14,98	16,95	19,05	20,45	21,54	23,64	27,14	30,26	33,76	37,26	40,32	
15,58	17,18	19,45	21,85	23,45	24,74	27,14	31,14	34,76	38,76	42,76	46,32	
17,58	19,38	21,95	24,65	26,45	27,94	30,64	35,14	39,26	43,76	48,26	52,32	
19,58	21,58	24,45	27,45	29,45	31,14	34,14	39,14	43,76	48,76	53,76	58,32	
21,58	23,78	26,95	30,25	32,45	34,34	37,64	43,14	48,26	53,76	59,26	64,32	
23,58	25,98	29,45	33,05	35,45	37,54	41,14	47,14	52,76	58,76	64,76	70,32	
25,58	28,18	31,95	35,85	38,45	40,74	44,64	51,14	57,26	63,76	70,26	76,32	
27,58	30,38	34,45	38,65	41,45	43,94	48,14	55,14	61,76	68,76	75,76	82,32	
29,58	32,58	36,95	41,45	44,45	47,14	51,64	59,14	66,26	73,76	81,26	88,32	
31,58	34,78	39,45	44,25	47,45	50,34	55,14	63,14	70,76	78,76	86,76	94,32	
		44,45	49,85	53,45	56,74	62,14	71,14	79,76	88,76	97,76	106,32	
		49,45	55,45	59,45	63,14	69,14	79,14	88,76	98,76	108,76	118,32	

1.3.7. Rozměrové tabulky vodičů pro vinutí

V tab. 2 jsou uvedeny normalizované průměry kruhových vodičů, jejich průřezy a izolační přírůstky pro nejčastější druhy izolace. Pro jiné druhy izolace jsou přírůstky uvedeny v katalogu ZSE č. 20.00.

V tab. 3 jsou skutečné průřezy měděných a hliníkových pásů se jmenovitou šířkou $b = 1,4$ až 20 mm a jmenovitou tloušťkou $t = 0,8$ až $6,0$ mm. Skutečný průřez je s ohledem na zaoblení hran menší než geometrický průřez $b \times t$.

V tab. 4 jsou uvedeny izolační přírůstky pásů s běžnými izolacemi.

Poznámka. Vodiče čtvercového průřezu se pro jejich náchylnost ke zkrucování nepoužívají.

Pro vývody cívek elektromotorů se používají vodiče typu

S 1034 (0,50–0,75–1,0–1,5–2,5–4,0 mm²)

S 1096 (0,50–0,75–1,0–1,5–2,5–4,0–6,0 mm²)

S 1096 Al (1,5–2,5–4,0–6,0 mm²)

1.3.8. Tabulky charakteristických vlastností používaných materiálů

V tab. 5a a 5b jsou uvedeny charakteristické vlastnosti vodičů a izolantů, používaných v konstrukci elektrických strojů.

Vlastnosti jiných, zejména nových izolačních materiálů lze nalézt např. v [1].

1.3.9. Kontrolní otázky

1. Jaké materiály se používají ke stavbě elektrických strojů?
2. Jak se dělí magnetické materiály?
3. Co jsou orientované plechy a jaké jsou jejich výhody?
4. Kde se dají výhodně využít vlastnosti orientovaných plechů?
5. Jak se označují plechy pro elektrotechniku?
6. Co to jsou jmenovité měrné ztráty?
7. Které materiály se používají na konstrukční části strojů?
8. Ze kterých údajů se skládá značka vodičů? Uveďte příklad označení vodičů ve výrobních podkladech.
9. Jakými značkami se vyznačuje druh izolace vodičů?
10. Co se rozumí izolačním přírůstkem u kruhových a plochých vodičů a jaký je jeho význam?
11. Proč se nepoužívají vodiče čtvercového průřezu?

Tabulka 4a. Izolační přírůstky plochých pásů

Šířka pásu b mm	Do tloušťky t mm	Třída teplotní stálosti				
		A	A	A	F	B
		Izolační přírůstek [mm] pro izolaci				
		B	B × B	2B × B	2 KT	2 KB
1,4	1,4	0,30	0,50	0,65	0,30	0,40
1,6	1,4	0,35				
	1,6					
1,8	1,3	0,30				
	1,8	0,35				
2,0	1,2	0,30				
	2,0	0,35				
2,2	2,2					0,32
						0,30
2,5	2,2					0,32
	2,5					0,30
2,8	2,0					0,32
	2,8					
3,0	2,0					
	3,0					
3,2	3,2					
3,5	3,0	0,40				
	3,5					
4,0	2,5	0,35				0,45
	3,5					0,40
4,5	4,0	0,40	0,60	0,75		0,45
	2,2	0,35	0,50	0,65		
	3,2	0,40	0,60			0,40
	3,5					0,75
	4,0				0,80	0,85
	4,5	0,50	—			
5,0	2,2	0,35	0,50	0,65	0,32	0,40
	3,0	0,40	0,60			0,45
	3,5					0,75

Tabulka 4a. — pokračování 1

Šířka pásu b mm	Do tloušťky t mm	Třída teplotní stálosti				
		A	A	A	F	B
		Izolační přírůstek [mm] pro izolaci				
		2 B	B × B	2B × B	KT	2 KB
5,0	4,0		0,80	0,85		
	5,0	0,50			—	0,55
5,5	2,5	0,40	0,50	0,65	0,32	0,45
	3,5		0,60	0,75		
	4,0	0,50	0,80	0,85	0,37	0,55
	5,5				—	
6,0	2,5	0,40	0,50	0,65	0,32	0,45
	3,2		0,60	0,75		
	3,5	0,50			0,37	0,55
	4,0		0,80	0,85		
	6,0				—	
6,5	3,0	0,40	0,60	0,75	0,32	0,45
	4,0	0,50	0,80	0,85	0,37	0,55
	5,5				—	
	6,0				—	
7,0	2,8	0,40	0,60	0,75	0,32	0,45
	4,0	0,50	0,80	0,85	0,37	0,55
	5,5				—	
	6,0			0,90	—	—
8,0	2,5	0,40	0,60	0,75	0,32	0,45
	4,0	0,50	0,80	0,85	0,37	0,55
	5,0				—	
	5,5				—	
	6,0		0,85	0,90	—	—
9,0	4,0		0,80	0,85	0,37	0,55
	5,5		0,85	0,90	—	—
	6,0				—	—
10,0	4,0		0,80	0,85	0,37	0,55

Tabulka 4a. — pokračování 2

Šířka pásu b mm	Do tloušťky t mm	Třída teplotní stálosti				
		A	A	A	F	B
		Izolační přírůstek [mm] pro izolaci				
		B	B × B	2B × B	2 KT	2 KB
10,0	5,5	0,50	0,85	0,90	—	0,55
	6,0				—	—
11,0	3,5		0,80	0,85	0,37	0,55
	4,0		0,85	0,90		
	5,5				—	—
	6,0				—	—
12,0	3,2		0,80	0,85	0,37	0,55
	4,0		0,85	0,90		
	5,5				—	—
	5,5				—	—
	6,0			—	—	
13,0	3,0	0,80	0,85		0,55	
	5,5	0,85	0,90	—	—	
	6,0			—	—	
14,0	2,8	0,80	0,85	—	0,55	
	5,5	0,85	0,90	—	—	
	6,0			—	—	
15,0	2,5	0,80	0,85	—	0,55	
	5,5	0,85	0,90	—	—	
	6,0			—	—	
16,0	2,5	0,80	0,85	—	0,55	
	5,5	0,85	0,90	—	—	
	6,0			—	—	
18,0	6,0	0,80			—	—
20,0	5,0				—	—

Tabulka 4b. Izolační

Pásky s kombinovanou								
Do průřezu mm ²	Do šířky mm	Izolační						
		PB	3PB	4PB	PB	6PB		
2,5	2	0,50	×	×	×	×	×	×
6	5		0,65	0,80	0,95	1,10	×	×
11	5	0,60	0,75	0,80	1,05	1,20	1,25	1,40
15	6						1,35	1,50
20	8							
64	16							
108	18							

Pásky s kombinovanou								
Do průřezu mm ²	Do šířky mm	Izolační						
		2P	3P	4P	5P	6P		
2,5	2	0,30	×	×	×	×	×	×
6	5		0,45	0,60	0,75	0,90	×	×
11	5	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90	1,05	1,20
15	6							
20	8							
40	18							
120	20							

Pásky s izolací n PB se vyrábějí jen do šířky 18 mm a tloušťky 6 mm s poměrem

Pásky s izolací n P se vyrábějí jen do šířky 20 mm a tloušťky 6 mm s poměrem

přírůstky plochých pásů

izolací n PB

přírůstek [mm]

×	×	×	×	×	×	×	×
×	×	×	×	×	×	×	×
1,70	2,00	×	×	×	×	×	×
1,80	2,10	×	×	×	×	×	×
		2,40	2,70	3,30	3,90	5,10	5,70
		×	×	×	×	×	×

izolací papírem nP

přírůstek [mm]

×	×	×	×	×	×	×	×
×	×	×	×	×	×	×	×
1,50	1,80	×	×	×	×	×	×
		×	×	×	×	×	×
		2,10	2,40	3,00	3,60	4,80	5,40
		×	×	×	×	×	×

stran maximálně 1 : 8

stran maximálně 1 : 8

Tabulka 5a. Charakteristické vlastnosti používaných vodičů

Materiál	Měrný odpor ρ [Ω mm ² /m]	Měrná hmotnost γ [g/cm ³]	Měrné teplo c [J/K cm ³]	Měrná tepelná vodivost λ [W/K m]
Stříbro	0,0165	10,50	2,40	410
Měď	0,0178	8,90	3,40	280
Hliník	0,0330	2,70	2,40	200
Mosaz	0,0850	8,40	3,20	90
Olovo	0,2100	11,30	1,50	31
Ocel	0,1 až 0,25	7,80	3,70	40 až 52
Plechý Et 2,6/0,5 mm	0,15	7,60 až 7,85	3,55	28 — podél 2 — napříč
Plechý Et 1,3/0,35 mm	0,60	7,55 až 7,60	3,50	
Sedá litina	0,90	7,25	3,45	46
Nikeln	0,1 až 0,44	8,98	4,50	80
Chrómníkl	1,03	8,35	3,64	60
Grafit	750,00	1,60	1,70	67
Rtut	0,95	13,60	1,90	7,5
Wolfram	0,07	19,10	2,60	140

Tabulka 5b. Charakteristické vlastnosti používaných izolantů

Materiál	Poměrná permitivita ϵ_r	Měrná hmotnost γ [g/cm ³]	Elektrická pevnost K_p [kV/cm]	Měrné teplo c [J/K m ³]	Měrná tepelná vodivost λ [W/K m]
Asfalt				1,70 až 2,30	0,700
Azbest		2,50		2,00	0,220
Bakelit	4,5 až 7,5	1,35	12 až 20		
Bavlna neimpregnovaná		1,48			0,066
Bavlna impregnovaná					0,240
CO ₂					0,016
Dřevo					0,200
Dusík					0,024
HN ₃					0,023
Lesklá lepenka	5,0 až 6,0	1,40	300 až 600	1,38	0,170
Novodur	3,4	1,38	500		0,150
Transformátový olej	2,3	0,90 až 0,92	minimálně 128	1,65	0,165
Papír neimpregnovaný	3,9 až 7,5	1,30	4 až 50	2,00	0,110
Papír impregnovaný					0,170
Porcelán	5,7 až 6,8	2,30 až 2,50	30 až 350	2,20	1,500
SF ₆					0,014
Sklo	5,0 až 8,0	2,40 až 2,70	160 až 450	2,20	0,800
Slída	6,0 až 8,0	2,70 až 3,20	300 až 1000	2,10	0,360
Syntetické pryskyřice					0,330
Steatit	5,4	2,60 až 2,80	200 až 300	2,20	2,300
Voda	80,0	1,00		4,20	0,600
Vodík		0,00007			0,190
Vzduch	1,0	0,00121	21	0,0012	0,026

1.4. CHLAZENÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ

1.4.1. Základní údaje

Ztrátami se oteplují ty části elektrického stroje, ve kterých vznikají. V dalších úvahách a při návrzích budeme počítat oteplení vodičů způsobené Jouleovými ztrátami a oteplení železa způsobené ztrátami v železe.

Na velikost oteplení má kromě velikosti ztrát vliv i způsob zatížení stroje nebo přístroje.

ČSN 350000 rozlišuje tyto základní druhy zatížení:

1. trvalé zatížení — označení S1
2. krátkodobý chod — označení S2
3. přerušovaný chod — označení S3
4. přerušované zatížení — označení S6

a další složitější druhy

5. přerušovaný chod s rozběhem — označení S4
6. přerušovaný chod s rozběhem a elektrickým brzděním — označení S5
7. přerušované zatížení s rozběhem a elektrickým brzděním — označení S7
8. přerušované zatížení se změnou otáček — označení S8.

Grafický průběh jednotlivých druhů zatížení je na obr. 2.

Druhy zatížení nás budou dále zajímat v souvislosti s oteplením strojů.

Oteplením $\Delta\vartheta$ budeme rozumět rozdíl mezi teplotou ohřivaného tělesa a teplotou chladicího prostředí — okolí ϑ_0

$$\Delta\vartheta = \vartheta_t - \vartheta_0 \quad [\text{K}; ^\circ\text{C}, ^\circ\text{C}] \quad (1)^*$$

Dovolená oteplení a maximální teploty okolí jsou uvedeny v tab. 6.

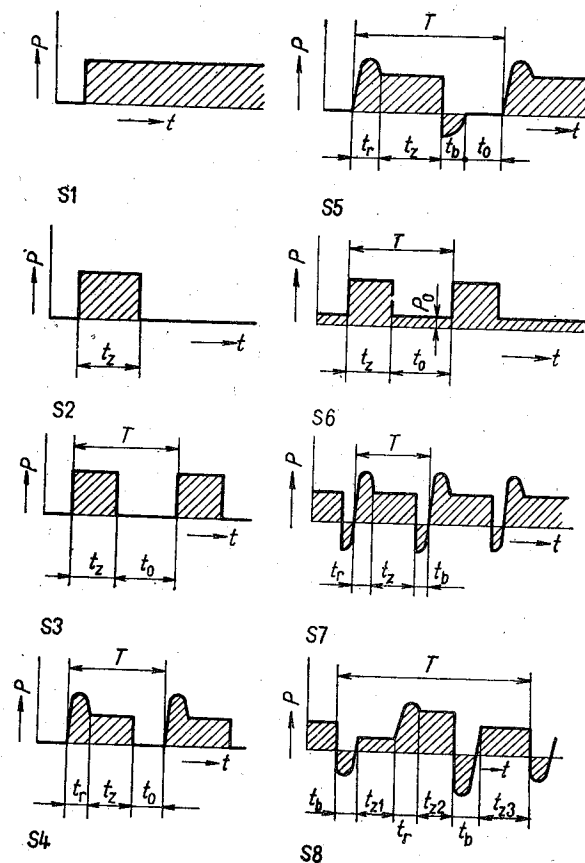
1.4.2. Trvalé zatížení

Kdyby bylo oteplované těleso dokonale tepelně izolováno, spotřebovaly by se všechny vzniklé ztráty na zvětšení tepelného obsahu tělesa. Při stálých ztrátách by jeho teplota rovnoměrně stoupala.

Části elektrických strojů a přístrojů nejsou nikdy dokonale tepelně izolované, ale jsou obklopeny chladicím prostředím, kterým je nejčastěji

*) Pozn. red.

Ve shodě s ČSN 011300 — Zákonné měrové jednotky, z roku 1974, budeme oteplení udávat v kelvinech (K), ale teplotu z praktických důvodů ve stupních Celsiových ($^\circ\text{C}$). Platí samozřejmě, že $1 \text{ K} \underline{\underline{=}} 1 ^\circ\text{C}$.



Obr. 2. Druhy zatížení podle ČSN 350000

S1 trvalé zatížení,
S2 krátkodobý chod,
S3 přerušovaný chod,
S4 přerušovaný chod s rozběhem,
S5 přerušovaný chod s rozběhem a elektrickým brzděním,
S6 přerušované zatížení,
S7 přerušované zatížení s rozběhem a elektrickým brzděním,
S8 přerušované zatížení se změnou otáček

vzduch, olej, voda, vodík apod. Toto prostředí odebírá tělesu teplo — těleso se tedy jeho působením ochlazuje.

Přestup tepla z tělesa do chladicího prostředí je závislý na velikosti povrchu, kterým se těleso stýká s chladicím prostředím, na vlastnostech tohoto prostředí a na tepelném spádu, tzn. na oteplení povrchu tělesa proti prostředí. Podle toho je přestup tepla tím intenzivnější, čím vyšší je oteplení. Na začátku je přestup tepla menší, více tepla se spotřebuje na zvětšení tepelného obsahu a teplota tělesa stoupá rychleji. S rostoucím oteplením se přestup tepla zlepšuje; více tepla se odevzdá prostředí a méně se spotřebuje na ohřívání tělesa, takže čím větší je oteplení, tím pomaleji stoupá teplota tělesa.

Tabulka 6. Dovolené oteplení částí strojů nepřímo chlazených vzduchem (podle ČSN 35 0000)

Bod	Vínutí nebo jiná část strojí	Třída izolace													
		A		E		B		F		H					
		teploměřem	sondou	teploměřem	sondou	teploměřem	sondou	teploměřem	sondou	teploměřem	sondou				
1	Vínutí na střídavý proud strojů s výkonem 5000 kW a více nebo stroje s délkou železa 1 m a více	—	60	—	70	—	88	—	100	—	125	—	125		
2	Střídavá vínutí strojů s výkonem menším než v bodě 1 Stejnoseměrné budicí vínutí střídavých a stejnosměrných strojů, jiné než v bodě 3 a 4 Vínutí kotev spojené s komutátorem	50	60	—	56	75	—	70	80	—	85	100	—	105	125
3	Stejnoseměrné budicí vínutí turbostrojí	—	—	—	—	—	—	—	90	—	—	—	—	—	—

4	Budicí vínutí několikavrstvové s malým odporem a kompenzační vínutí Budicí vínutí jednovrstvové holé, nebo s lakovanými čely	60	60	—	75	75	—	80	80	—	100	100	—	125	125	—
5	Izolované vínutí trvale spojené nakrátko	60	—	—	75	—	—	80	—	—	100	—	—	—	—	—
6	Neizolované vínutí trvale spojené nakrátko	Tyto části se nesmí nikdy oteplít tak, že by vzniklo nebezpečí poškození izolace nebo jiného materiálu v jejich sousedství														
7	Magnetická jádra a jiné části které nejsou ve styku s vínutím															
8	Magnetická jádra a jiné části ve styku s vínutím	60	—	—	75	—	—	80	—	—	100	—	—	125	—	—
9	Komutátory a kroužky	60	—	—	70	—	—	80	—	—	90	—	—	100	—	—
	Oteplení částí nepřímo chlazených vodíkem a částí s přímým chlazením plynem a kapalinami jsou v tabulkách 9 a 10 v ČSN 35 0000															

Při určitém oteplení vznikne rovnovážný stav, kdy se všechno teplo vznikající v tělese odevzdává prostředí a kdy se v důsledku toho teplota tělesa dále nezvyšuje. Těleso dosáhlo ustáleného (maximálního) oteplení.

Pro ustálený stav platí

ztracená energie = množství odevzdaného tepla do prostředí

$$\Delta P \, dt = \alpha S \Delta \vartheta \, dt \quad (2)$$

kde $\Delta P \, dt$ je ztracená energie,
 $\alpha S \Delta \vartheta \, dt$ teplo odevzdané prostředí.

Po úpravě dostaneme základní rovnici, která platí pro ustálený tepelný stav

$$\Delta P = \alpha S \Delta \vartheta \quad [\text{W}; \text{W K}^{-1} \text{m}^{-2}, \text{m}^2, \text{K}] \quad (3)$$

kde ΔP jsou celkové ztráty,

S je chladicí povrch tělesa,

$\Delta \vartheta$ oteplení povrchu tělesa proti prostředí,

α součinitel přestupu tepla.

Z rovnice (3) vyplývá definice součinitele přestupu tepla: Součinitel přestupu tepla α představuje ztráty ve wattech, které chladicímu prostředí odevzdává 1 m² chladicího povrchu při teplotním spádu 1 K. Udává se ve wattech na kelvin a metr čtverečný (W K⁻¹m⁻²).

Velikost součinitele přestupu tepla závisí na vlastnostech chladiva, na oteplení a na barvě a jakosti chladicího povrchu.

Do vzduchu se teplo odevzdává sáláním, vedením a prouděním.

Nejméně tepla se odevzdává vedením, neboť vzduch je špatným vodičem tepla. Proto se vedení tepla uvažuje vždy dohromady s prouděním. Prouděním se teplo odevzdává tak, že zahřátý vzduch stoupá nahoru, na jeho místo se tlačí zespodu chladnější vzduch a přichází do styku s chladicí plochou.

Pro proudění a vedení (přirozená konvekce) je součinitel přestupu tepla dán vztahem

$$\alpha_p = 6,5 + 0,05 \Delta \vartheta \quad [\text{W K}^{-1} \text{m}^{-2}; \text{K}] \quad (4a)$$

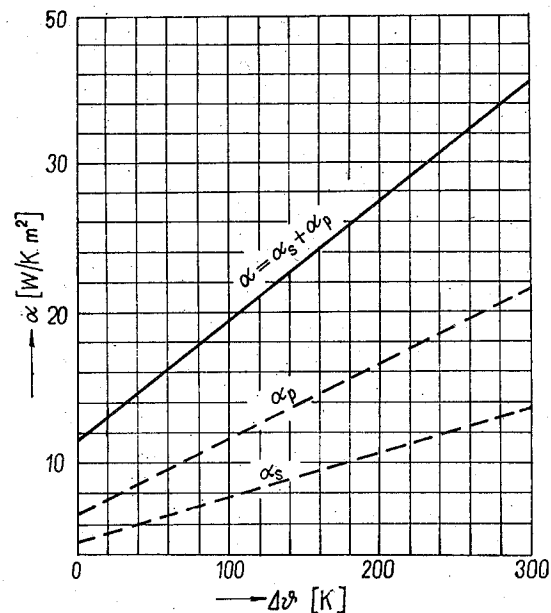
Pro samotné sálání je součinitel přestupu tepla

$$\alpha_s = 4,8 + 0,03 \Delta \vartheta \quad [\text{W K}^{-1} \text{m}^{-2}; \text{K}] \quad (4b)$$

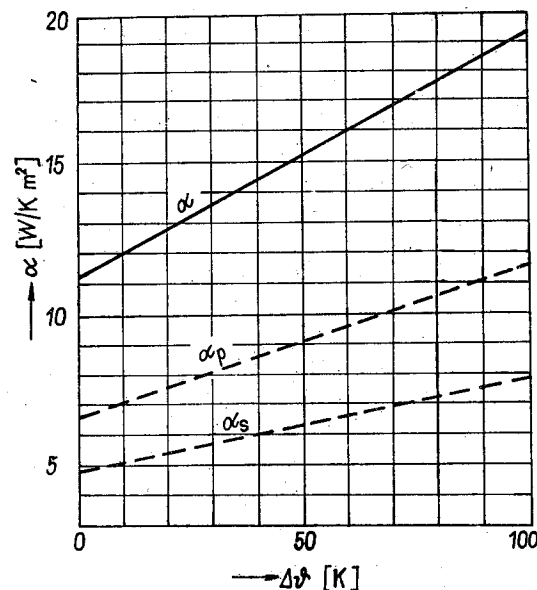
Společný součinitel přestupu tepla

$$\alpha = \alpha_p + \alpha_s = 11,3 + 0,08 \Delta \vartheta \quad [\text{W K}^{-1} \text{m}^{-2}] \quad (4c)$$

S tímto společným součinitelem α je možno počítat tehdy, jestliže ochlazovací plocha je volně vystavena chladicímu vzduchu, takže se uplatní i sálání i proudění s vedením.



Obr. 3a. Součinitel přestupu tepla pro stojící vzduch v závislosti na oteplení



Obr. 3b. Součinitel přestupu tepla pro rozsah oteplení 0 až 100 K

Rovnice (4a), (4b), (4c) představují rovnice přímek a jsou nakresleny na obr. 3a pro rozsah oteplení od 0 do 300 K a na obr. 3b pro rozsah oteplení od 0 do 100 K.

Z obr. 3b je vidět, že pro průměrné oteplení 50 K je společný součinitel přestupu tepla

$$\alpha \approx 15 \text{ W K}^{-1}\text{m}^{-2} \quad (5)$$

Olej je velmi dobrým chladivem. Jeho součinitel přestupu tepla je

$$\alpha_o = 80 \text{ až } 110 \text{ W K}^{-1}\text{m}^{-2} \quad (6)$$

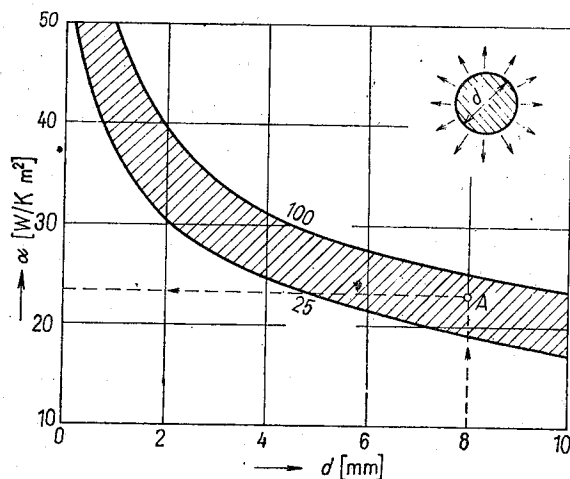
pro obvyklé dovolené oteplení povrchu proti oleji 10 až 24 K.

Ke chlazení některých částí velkých turboalternátorů a hydroalternátorů se užívá voda, která velmi dobře odvádí teplo, ale na rozdíl od oleje nemůže zastupovat i izolant.

Speciální případy

a) Dráty. Z povrchu drátů se teplo odvádí lépe než z rovinné plochy, neboť na stejný povrch připadá větší množství chladicího vzduchu.

Na obr. 4 je uvedena velikost součinitele přestupu tepla α pro dráty o průměru do 10 mm při oteplení 25 až 100 K.



Obr. 4. Součinitel přestupu tepla pro vodiče do $\varnothing 10$ mm při oteplení 25 až 100 K

b) Kanály. Stěny kanálů odevzdávají teplo pouze prouděním. Minimální šířky jsou:

v oleji 3 mm, jestliže má chladit pouze jedna stěna kanálu;
6 mm, jestliže mají chladit obě stěny;

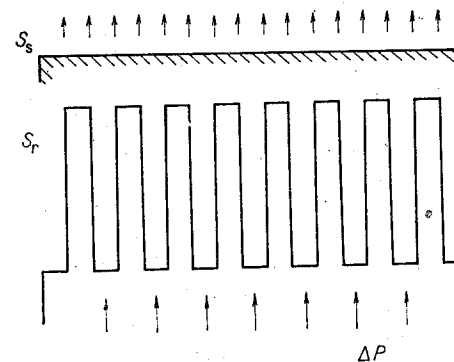
ve vzduchu 8 mm, jestliže má chladit pouze jedna stěna;
16 mm, jestliže mají chladit obě stěny.

c) Žebrované plochy. Sáláním a prouděním odevzdává teplo jen kolmý průmět žebrované plochy S_s (obr. 5). Stěny žeber odevzdávají teplo pouze prouděním.

Proto platí

$$\Delta P = (S_s \alpha + S_r \alpha_p) \Delta \vartheta \quad [\text{W}; \text{m}^2, \text{W K}^{-1}\text{m}^{-2}, \text{K}] \quad (7)$$

kde S_r je povrch chladicích žeber.



Obr. 5. Chlazení žebrovanými stěnami

d) Chlazení proudem vzduchu. Nuceným prouděním vzduchu (nucená konvekce) se chlazení několikanásobně zlepšuje. Na obr. 6 je nakreslena charakteristika součinitele přestupu tepla v závislosti na rychlosti proudícího vzduchu.

Tohoto diagramu použijeme při výpočtu oteplení v točivých elektrických strojích. Za rychlost chladicího vzduchu budeme brát asi 40 % obvodové rychlosti ventilátoru.

Potřebné množství chladicího vzduchu k odvedení ztrát ΔP

$$Q = \frac{\Delta P}{c_p \Delta \vartheta} = 0,82 \frac{\Delta P}{\Delta \vartheta} \quad [\text{m}^3\text{s}^{-1}; \text{kW}, \text{K}] \quad (8)$$

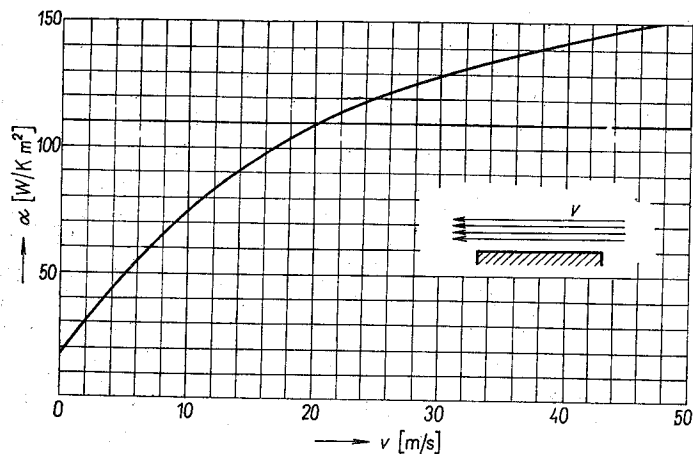
kde ΔP jsou celkové ztráty ve stroji,

$\Delta \vartheta$ je oteplení vzduchu při průchodu strojem, maximálně 20 K,
 c_p měrné teplo vzduchu za stálého tlaku ($1,228 \text{ kJ K}^{-1}\text{m}^{-3}$).

Příklad 1

Jaké množství vzduchu je potřebné ke chlazení generátoru o výkonu 40 MVA? Při předpokládané účinnosti 97 % a při $\cos \varphi = 0,8$ budou ztráty

$$\Delta P = P \cos \varphi (1 - \eta) = 40 \cdot 10^3 \cdot 0,8 \cdot 0,03 = 960 \text{ kW}$$



Obr. 6. Součinitel přestupu tepla v proudícím vzduchu

Při oteplení vzduchu o 25 K bude potřebné množství vzduchu

$$Q = 0,82 \frac{960}{25} = 31,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

Za jeden den to je

$$V = 31,5 \cdot 86\,400 = 2\,720\,000 \text{ m}^3 \text{ vzduchu}$$

nebo

$$m = 2\,720\,000 \cdot 1,29 = 3\,500\,000 \text{ kg}$$

Z příkladu je zřejmé, proč musí mít stroje velkých výkonů oběžné chlazení. Kdyby se do stroje vháněl vždy čerstvý vzduch, stačilo by i nepatrné množství prachu ve vzduchu, aby se stroj nebezpečně znečistil.

Poznámka. Rovnice (3), která platí pro trvalé zatížení, se používá při řešení dvou problémů:

- při známé chladicí ploše se z ní určí oteplení;
- při předepsaném dovoleném oteplení se z ní určí potřebná velikost chladicí plochy.

1.4.3. Krátkodobý chod

Při krátkodobém chodu je období chodu vystřídáno trvalým chodem naprázdno.

Při velmi krátké době chodu stroje je možné přestup tepla do prostředí zanedbat a počítat jen se zvětšováním tepelného obsahu tělesa. V takovém případě předpokládáme, že všechno teplo (ztracená elektrická práce) se spotřebuje na zvýšení teploty tělesa.

Pro výpočet oteplení elektrických strojů a přístrojů platí následující základní rovnice pro velmi krátké doby chodu stroje

$$\Delta Pt = cV\Delta\theta \quad [\text{W, s; J K}^{-1}\text{m}^{-3}, \text{m}^3, \text{K}] \quad (9)$$

kde ΔP jsou ztráty,

t je čas, během kterého ztráty vznikly,

V objem,

$\Delta\theta$ oteplení,

c měrné teplo.

Podle rovnice (9) je možné měrné teplo definovat jako elektrickou práci v joulech, kterou se 1 m³ ohřeje o 1 K.

Měď má měrné teplo $c = 3,4 \cdot 10^6 \text{ J K}^{-1}\text{m}^{-3}$; hliník $c = 2,4 \cdot 10^6 \text{ J K}^{-1}\text{m}^{-3}$.

Pro ostatní materiály používané při stavbě elektrických strojů a přístrojů jsou hodnoty měrného tepla uvedeny v tab. 5 na str. 31.

Poznámka

1. Rovnice (9) se používá při řešení dvou problémů:

- při daném objemu materiálu, ve kterém vznikají ztráty, se z ní určí příslušné oteplení;
- při předepsaném dovoleném oteplení se z této rovnice určí potřebný objem materiálu.

2. Podle rovnice (9) se počítá i oteplení způsobené zkratovými proudy, které trvají jen tak krátkou dobu, než je ochrana neodpojí.

Příklad 2

Měděný vodič cívky elektromagnetu má objem $9,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ a vznikají v něm ztráty 200 W. Jaké je oteplení cívky po zapnutí trvajícím 10 s?

Z rovnice (9) je oteplení

$$\Delta\theta = \frac{\Delta Pt}{cV} = \frac{200 \cdot 10}{3,4 \cdot 10^6 \cdot 9,8 \cdot 10^{-6}} = 60 \text{ K}$$

1.4.4. Průběh oteplování a ochlazování

Oteplování homogenního tělesa stálými ztrátami probíhá podle exponenciální křivky, dané rovnicí

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{\max}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad [\text{K}; \text{K}, \text{s}, \text{s}] \quad (10)$$

kde $\Delta\vartheta$ je okamžité oteplení,

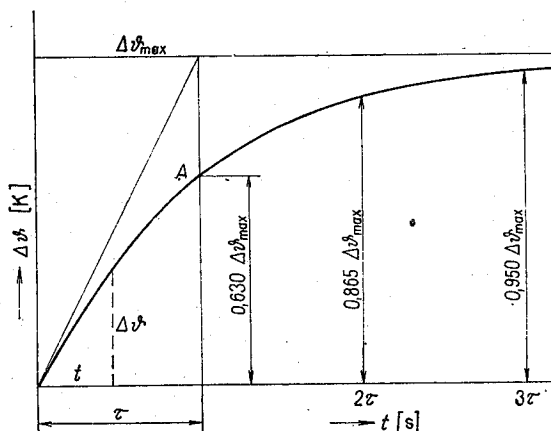
$\Delta\vartheta_{\max}$ ustálené oteplení (maximální hodnota dosaženého oteplení),

e základ přirozených logaritmů (2,7182),

t čas, ve kterém se zkoumá okamžité oteplení,

τ časová konstanta.

Průběh oteplování v závislosti na čase je nakreslen na obr. 7. Oteplovací křivku sestrojíme pomocí rovnice (10) tak, že pro různé časy t vypočteme příslušné oteplování.



Obr. 7. Oteplovací křivka

Časová konstanta τ představuje čas, za který by těleso dosáhlo ustáleného oteplení, kdyby se prostředí neodevzdávalo žádné teplo, ale všechno by se spotřebovalo jen na zvětšení tepelného obsahu. V takovém případě by oteplení probíhalo po tečně sestrojené v počátku k oteplovací křivce.

Z obr. 7 je vidět, že směrnice tečny v počátku je dána poměrem

$$\frac{\Delta\vartheta_{\max}}{\tau} \quad (11)$$

Velikost časové konstanty určíme touto úvahou:

Maximální oteplení, odpovídající ustálenému tepelnému stavu podle (3) je

$$\Delta\vartheta_{\max} = \frac{\Delta P}{\alpha S}$$

Kdyby oteplování probíhalo podle tečny, bylo by podle (9)

$$\Delta\vartheta_{\max} = \frac{\Delta P \tau}{cV}$$

Porovnáním obou výrazů dostaneme

$$\frac{\Delta P}{\alpha S} = \frac{\Delta P \tau}{cV}$$

a z toho vychází pro časovou konstantu vztah

$$\tau = \frac{cV}{\alpha S} \quad [\text{s}] \quad (12)$$

Výhodnější je při výpočtu časové konstanty elektrických strojů udávat jejich hmotnost a ne objem, takže

$$\tau = \frac{\sum cm}{\sum \alpha S} \quad [\text{s}; \text{J K}^{-1}\text{kg}^{-1}, \text{kg}, \text{W K}^{-1}\text{m}^{-2}, \text{m}^2] \quad (13)$$

Jednoduchý podíl je nahrazen podílem součtů, neboť elektrický stroj se skládá z různých materiálů rozdílných vlastností a velikostí.

V rovnici (13) musíme dosadit měrné teplo $[\text{J K}^{-1}\text{kg}^{-1}]$. Jeho velikost můžeme určit ze vztahu

$$c = \frac{c'}{\gamma} \quad [\text{J K}^{-1}\text{kg}^{-1}; \text{J K}^{-1}\text{m}^{-3}, \text{kg m}^{-3}] \quad (14)$$

Pro materiál elektrických strojů (měď a železo v obvyklém poměru) můžeme uvažovat průměrnou velikost

$$c = 440 \text{ J K}^{-1}\text{kg}^{-1}$$

Jestliže v rovnici (10) dosadíme za čas t časovou konstantu, bude oteplení

$$\Delta\vartheta = 0,63\Delta\vartheta_{\max}$$

To znamená, že za čas τ dosáhne oteplení asi 63 % velikosti ustáleného oteplení.

Podobně je možné zjistit, že:

za čas 2τ se dosáhne 86,5 % z oteplení $\Delta\vartheta_{\max}$

za čas 3τ se dosáhne 95 % z oteplení $\Delta\vartheta_{\max}$

Tyto údaje ulehčí kreslení oteplovací křivky (obr. 7).

Ochlazování z hodnoty oteplení $\Delta\vartheta_{\max}$ probíhá opět podle exponenciální křivky

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{\max} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (15)$$

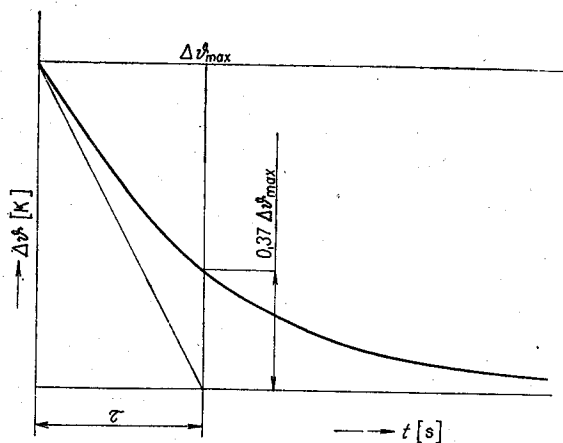
pro $t = \tau, 2\tau, 3\tau$, postupně vychází:

$$t = \tau, \Delta\vartheta = 0,37 \Delta\vartheta_{\max}$$

$$t = 2\tau, \Delta\vartheta = 0,235 \Delta\vartheta_{\max}$$

$$t = 3\tau, \Delta\vartheta = 0,05 \Delta\vartheta_{\max}$$

Ochlazovací křivka je na obr. 8.



Obr. 8. Ochlazovací křivka

Z rovnic (10) a (15) je vidět, že oteplení dosáhne ustáleného stavu, resp. nulové hodnoty, až v čase $t \rightarrow \infty$.

V praxi však považujeme oteplovací nebo ochlazovací pochod za skončený za čas $t = 3\tau$.

Poznámka. Stojí-li stroj, je časová konstanta točivých strojů při ochlazování větší než za chodu stroje. Jen při cizím větrání, které je stejně účinné pro otáčející i pro stojící stroj, je časová konstanta stejná.

Čím lépe je stroj chlazen, tím menší je jeho časová konstanta, tzn. že tím dříve dosáhne stroj ustáleného oteplení nebo konečného ochlazení.

Velikost časové konstanty bývá přibližně:

25 až 50 min pro otevřené motory 0,3 až 800 kW

25 až 45 min pro turboalternátory

2,5 až 3 h pro transformátory 100 až 10 000 kVA s přirozeným olejovým chlazením.

60 min pro zavřené indukční motory s ofukovanou kostrou

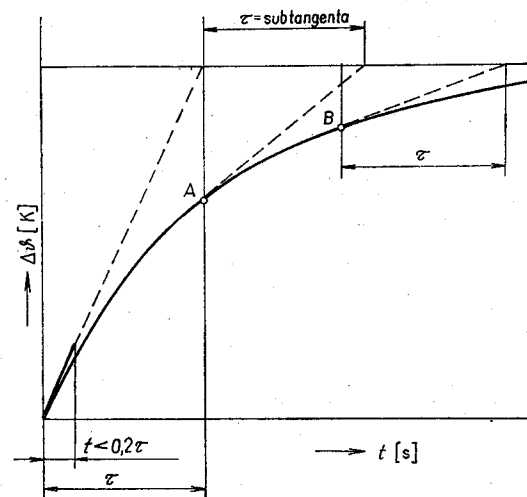
90 min pro zavřené motory bez povrchového chlazení

Výpočet časové konstanty podle rovnice (12) je jen informativní. Při návrhu nového stroje se jeho časová konstanta odhadne porovnáním s jinými podobnými, už zhotovenými stroji. U hotového stroje se časová konstanta určí oteplovací zkouškou, kdy se zjistí skutečný průběh oteplovací křivky. Z ní se pak stanoví pomocí tečny v počátku nebo pomocí hodnoty $0,63\Delta\vartheta_{\max}$, která odpovídá právě času shodnému s časovou konstantou.

1.4.5. Časový výkon

Jestliže se doba zatížení rovná alespoň 3τ , považuje se zatížení za trvalé a oteplení se počítá ze vztahu (3).

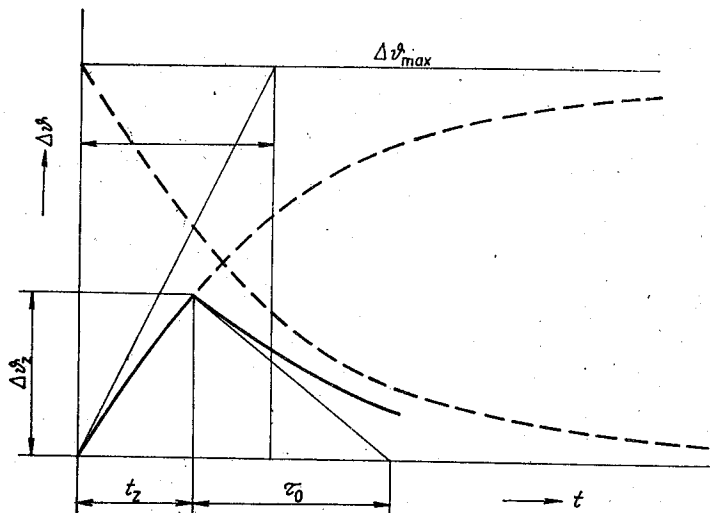
Je-li doba zatížení menší než $0,2\tau$, zanedbává se vyzařování tepla do prostředí, exponenciální křivka se nahrazuje přímkou podle obr. 9 a oteplení se vypočte z rovnice (9).



Obr. 9. Náhrada exponenciální křivky přímkou při krátkodobém zatížení

Jestliže je doba zatížení mezi dvěma uvedenými hranicemi ($0,2\tau$ a 3τ), mluvíme o časovém výkonu stroje. Stroj pracuje určitý čas, jeho oteplení dosáhne velikosti $\Delta\vartheta_z$ (obr. 10) a potom se zastaví. V klidu je tak dlouho, dokud se neochladí.

Aby byl stroj pracující jen krátkodobě dokonale využit, je třeba ho navrhnout tak, aby za čas t_z dosáhl dovoleného oteplení. Jeho trvalý výkon je potom menší než výkon krátkodobý. Doba zatížení se pak musí uvést na štítku motoru.



Obr. 10. Průběh oteplování a ochlazování při občasném zatížení

Časový výkon se obvykle udává pro čas 15, 30, 45 a 60 min. Uvádí se u motorů dráhových (trakčních), rozběhových, u motorů vodních stavidel apod.

U dráhových motorů se obvykle udává jejich hodinový výkon. Je to výkon, kterým je možné motor zatížit po dobu jedné hodiny tak, že jeho oteplení nepřekročí dovolenou hodnotu.

Jestliže zvolenému časovému výkonu odpovídají ztráty ΔP_t , je třeba stroj navrhnout na ztráty ΔP_∞

$$\Delta P_\infty = (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \Delta P_t \quad (16)$$

kde t je čas krátkodobého chodu.

1.4.6. Přerušovaný chod

Mluvíme o něm tehdy, jestliže se doba zatížení t_z střídá s dobou klidu t_0 a jestliže doba trvání jednoho pracovního cyklu

$$T = t_z + t_0$$

je kratší než 10 min.

Mírou přerušovaného chodu je tzv. zatěžovatel ζ , který je dán poměrem

$$\zeta = \frac{t_z}{t_z + t_0} \cdot 100 = \frac{t_z}{T} \cdot 100 \quad [\%] \quad (17)$$

Na přerušovaný chod se navrhuje jeřábové motory, výtahové motory, elektromagnetické brzdy a spouštěče.

Běžné hodnoty zatěžovatele bývají 12,5 %, 20 %, 25 %, 40 % a 60 %.

Je-li pracovní cyklus např. 10 min, potom při zatěžovateli $\zeta = 40 \%$ je stroj 4 min v chodu a 6 min v klidu.

Stroj s přerušovaným chodem se musí tepelně dimenzovat tak, aby byl dokonale využit a přitom aby jeho oteplení nepřekročilo dovolené meze. Poměr mezi trvalým výkonem P_∞ a výkonem při přerušovaném chodu P_ζ závisí na druhu konstrukce a na způsobu chlazení.

Pro jeřábové motory platí přibližně:

$$P_\infty = P_\zeta \sqrt{\zeta} \quad \text{stejnoseměrné motory} \quad (18a)$$

$$P_\infty = P_\zeta \sqrt[3]{\zeta} \quad \text{indukční motory} \quad (18b)$$

Je-li dán výkon motoru při určitém zatěžovateli ζ_1 , pak při jiném zatěžovateli ζ_2 bude jeho výkon dán vztahem

$$\frac{P_{\zeta_2}}{P_{\zeta_1}} = \sqrt{\frac{\zeta_1}{\zeta_2}} \quad (19)$$

Např. je-li znám výkon motoru při $\zeta = 25 \%$ (P_{25}), potom jeho výkon při $\zeta = 15 \%$ bude

$$P_{15} = P_{25} \sqrt{\frac{25}{15}} = P_{25} \cdot 1,25$$

a při $\zeta = 40 \%$

$$P_{40} = P_{25} \sqrt{\frac{25}{40}} = P_{25} \cdot 0,75$$

Průběh oteplování při přerušovaném i nepravidelném chodu můžeme určit kreslením oteplovacích i ochlazovacích charakteristik podle obr. 10.

Jestliže doby zatížení a klidu jsou kratší než $0,2\tau$, můžeme místo exponenciálních čar kreslit přímky.

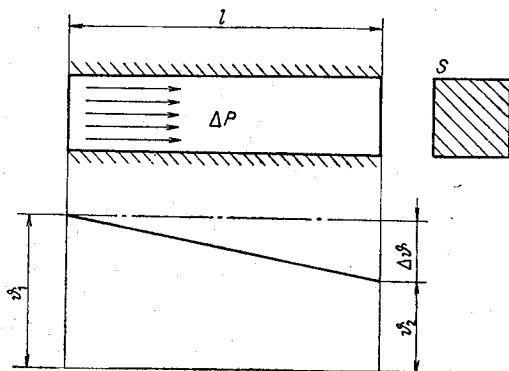
Poznámka. Při přerušovaném zatížení (S6) je na rozdíl od přerušovaného ohodu (S3) období zatížení vystřídáno obdobím ohodu naprázdno.

1.4.7. Přestup tepla materiálem, ve kterém nevznikají ztráty

Ztráty, které vznikají v aktivních částech elektrických strojů a přístrojů, musí při svém přechodu k chladicímu povrchu prostupovat neaktivními materiály, např. izolací vodičů, kostrou stroje, chladicími žebry apod.

Nejjednodušší případ jednorozměrného proudění představuje tyč nakreslená na obr. 11. Ztráty ΔP mají projít délkou z levého konce na pravý. Aby nastalo proudění, musí vzniknout v tyči určitý teplotní spád (tepelné napětí) $\Delta\vartheta$, daný rozdílem teplot obou konců tyče. Protože teplo proudí jen z teplejšího místa na chladnější, musí být levý konec tyče teplejší než pravý

$$\Delta\vartheta = \vartheta_1 - \vartheta_2 \quad (20)$$



Obr. 11. Proudění ztrát v neaktivním materiálu

Pro ustálený tepelný tok (množství tepla za sekundu = ztráty) platí vztah obdobný Ohmovu a Hopkinsonovu zákonu

$$\Delta P = \lambda \Delta\vartheta \quad [\text{W}; \text{W K}^{-1}, \text{K}] \quad (21)$$

kde λ je tepelná vodivost tyče.

Tepelná vodivost se určí podobně jako elektrická nebo magnetická vodivost

$$\lambda = \lambda \frac{S}{l} \quad [\text{W K}^{-1}; \text{W K}^{-1}\text{m}^{-1}, \text{m}^2, \text{m}] \quad (22)$$

kde λ je měrná tepelná vodivost.

Měrná tepelná vodivost udává ztráty ve wattech, které projdou tyčí 1 m dlouhou průřezu 1 m² při teplotním spádu 1 K.

Pro přestup ztrát prostředím budeme používat vztah

$$\Delta P = \lambda \frac{S}{l} \Delta\vartheta \quad [\text{W}; \text{W m}^{-1}, \text{m}^2, \text{m}, \text{K}] \quad (23)$$

Z rovnice (23) dostaneme i rozměr měrné tepelné vodivosti

$$[\lambda] = \frac{[\Delta P] \cdot [l]}{[S] \cdot [\vartheta]} = \frac{\text{W} \cdot \text{m}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} = \text{W K}^{-1}\text{m}^{-1}$$

Měrné tepelné vodivosti materiálů používaných v elektrotechnice jsou uvedeny v tab. 5 na str. 31.

Příklad 3

Jaký tepelný tok (ztráty) může odvést hliníková tyč dlouhá 10 cm při teplotním spádu 10 K, je-li její průřez 5 cm²?

Z tab. 5 zjistíme tepelnou vodivost hliníku $\lambda = 203 \text{ W K}^{-1}\text{m}^{-1}$, takže tepelný tok podle (23) je

$$\Delta P = 203 \frac{5 \cdot 10^{-4}}{0,1} \cdot 10 = 10,15 \text{ W}$$

Rovnici (23) můžeme použít pro výpočet teplotního spádu, potřebného pro přestup ztrát z aktivního materiálu (např. vodiče) přes izolaci k chladicímu povrchu

$$\Delta\vartheta_1 = \frac{\Delta P l_1}{\lambda_1 S} \quad (24)$$

kde ΔP je tepelný tok (ztráty), který má projít izolací,

l_1 tloušťka izolace,

λ_1 měrná tepelná vodivost izolace,

S průřez izolace, kterým musí projít ztráty (obvyčejně je totožný s chladicím povrchem).

Příklad 4

Měděným vodičem průměru 6 mm prochází proud 100 A. Jak velký je teplotní spád potřebný k odvedení ztrát vznikajících ve vodiči s bavlněnou neimpregnovanou izolací tloušťky 1 mm? Jaké je oteplení povrchu izolace vůči okolí a jaké je oteplení vlastního vodiče (obr. 12)?

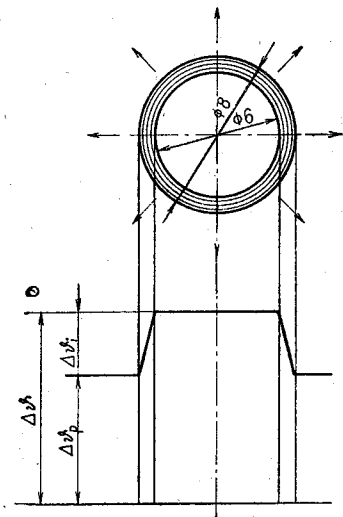
Protože neznáme skutečnou délku vodiče, budeme počítat s jednotkovou délkou 1 m.

Průřez vodiče je $28,3 \text{ mm}^2 = 28,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$. Odpor vodiče délky 1 m

$$R = \frac{1}{46} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{28,3 \cdot 10^{-6}} = 7,7 \cdot 10^{-4} \Omega$$

Ztráty v tomto odporu jsou

$$\Delta P_1 = 7,7 \cdot 10^{-4} \cdot 100^2 = 7,7 \text{ W}$$



Obr. 12. Výpočet teplotního spádu v izolaci — příklad 4

Chladicí povrch izolace

$$S = \pi \cdot 8 \cdot 10^{-3} \cdot 1 = 25,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Podle tab. 5 je pro neimpregnovanou bavlnu měrná tepelná vodivost $\lambda_1 = 0,066 \text{ W K}^{-1}\text{m}^{-1}$, takže podle (24) bude potřebný teplotní spád

$$\Delta \theta_1 = \frac{7,7 \cdot 0,001}{0,066 \cdot 25,2 \cdot 10^{-3}} = 4,6 \text{ K}$$

Oteplení povrchu izolace proti okolí podle rovnice (3)

$$\Delta \theta_p = \frac{\Delta P_1}{S \alpha} = \frac{7,7}{25,2 \cdot 10^{-3} \cdot 13} = 23,4 \text{ K}$$

Přitom jsme pro předpokládané oteplení uvažovali z obr. 3b součinitel přestupu tepla $13 \text{ W K}^{-1}\text{m}^{-2}$.

Oteplení vodiče proti teplotě okolí je potom

$$\Delta \theta = 23,4 + 4,6 = 28 \text{ K}$$

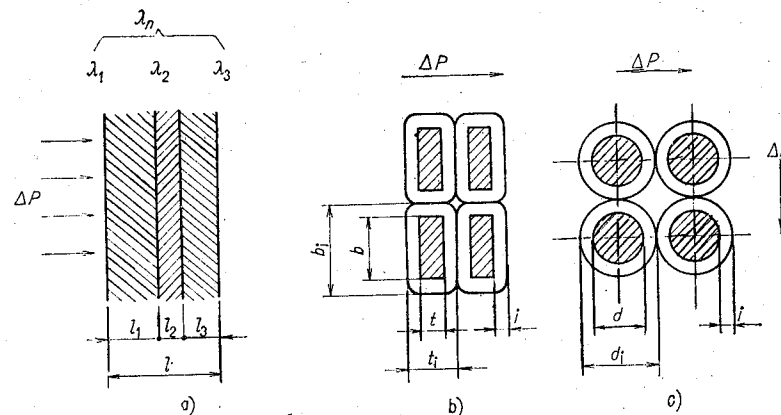
Průběh teplot je nakreslen na obr. 12.

1.4.8. Náhradní tepelná vodivost

Jestliže tepelný tok (ztráty) prostupuje několika složenými vrstvami s různou měrnou tepelnou vodivostí, můžeme je nahradit vrstvou jedinou, která bude mít tzv. náhradní tepelnou vodivost λ_n .

Náhradní tepelná vodivost se určí podle stejných zásad, jako se určují náhradní elektrické vodivosti při sériovém nebo paralelním řazení. Pro obvyklé sériové zapojení podle obr. 13a je náhradní tepelná vodivost dána výrazem

$$\lambda_n = \frac{l}{\frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2} + \frac{l_3}{\lambda_3} + \dots} \quad (25)$$



Obr. 13. Výpočet náhradní tepelné vodivosti: a) obecně, b) cívka z plochých vodičů, c) cívka z drátů

Podle této rovnice můžeme např. určit náhradní tepelnou vodivost dynamových plechů polepených papírem. Přitom však musíme počítat s tím, že i při dobrém stažení plechů se mezi nimi vyskytnou vzduchové vrstvy, které podstatně zmenšují tepelnou vodivost.

V praxi můžeme uvažovat pro dynamové plechy tloušťky 0,5 mm měrnou tepelnou vodivost v příčném směru

$$\lambda_n = (0,8 \text{ až } 1,5) \text{ W K}^{-1}\text{m}^{-1}$$

ale ve směru podélném je měrná tepelná vodivost podle tab. 5 až $65 \text{ W K}^{-1}\text{m}^{-1}$.

Náhradní tepelná vodivost cívek zhotovených z plochých pásů podle obr. 13b pro vyznačený směr postupu tepelného toku (ztrát) je dána

vztahem

$$\lambda_n = \lambda_i \left(\frac{2i}{b_i} + \frac{bt_1}{2b_i^2} \right) \quad (26)$$

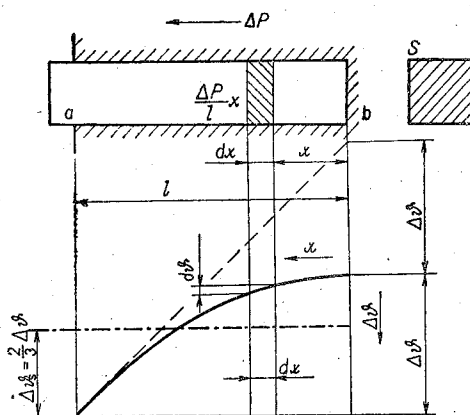
Pro cívku, jejíž vodiče mají kruhový průřez (obr. 13c), je měrná tepelná vodivost

$$\lambda_n = \lambda_i 0,6 \frac{d_1}{2i} \quad (27)$$

kde λ_i je měrná tepelná vodivost izolace,
 i tloušťka izolace.

V rovnicích (26) a (27) se předpokládá, že tepelná vodivost vodičů je v porovnání s vodivostí izolace nekonečně velká.

Poznámka. Vzduchové vrstvy zhoršují tepelnou vodivost izolace. Proto se izolace napouštějí. Impregnační látka s lepší vodivostí nahradí vzduchové vrstvy. Z tab. 5 je zřejmé, že tepelná vodivost impregnované bavlny je asi čtyřikrát větší než tepelná vodivost neimpregnované bavlny.



Obr. 14. Odvození teplotního spádu v aktivním materiálu

1.4.9. Jednosměrné proudění v aktivním materiálu

Na obr. 14 je nakreslena tyč, ve které vznikají celkové ztráty ΔP . Tyč je tepelně izolována tak, že tepelný tok může procházet jen zprava doleva k volnému konci tyče, který se ochlazuje chladícím prostředím. Naší úlohou je zjistit teplotní spád $\Delta\theta$, potřebný k průtoku tepelného toku (ztrát) vznikajícího v tyči k ochlazovanému konci.

V elementárním úseku tyče dlouhém dx vznikají ztráty

$$\frac{\Delta P}{l} x$$

kde l je délka tyče,
 x vzdálenost daného úseku od pravého okraje.

K průtoku uvedených ztrát úsekem délky dx je zapotřebí teplotního spádu (23)

$$d\theta = \frac{\frac{\Delta P}{l} x dx}{\lambda S} = \frac{\Delta P}{\lambda S} x dx$$

celkový potřebný teplotní spád

$$\Delta\theta = \frac{\Delta P}{\lambda S} \int_0^l x dx = \frac{\Delta P}{\lambda S} \cdot \left. \frac{x^2}{2} \right|_0^l = \frac{\Delta P}{2\lambda S} \left. x^2 \right|_0^l$$

Teplotní spád $\Delta\theta$ má parabolický průběh ($y = kx^2$), který je na obr. 14 nakreslen.

Dosažením horní a dolní meze dostaneme pro celkový teplotní spád vztah

$$\Delta\theta = \frac{\Delta Pl}{2\lambda S} \quad [\text{K}; \text{W}, \text{m}, \text{W K}^{-1}\text{m}^{-1}, \text{m}^2] \quad (28)$$

Střední oteplení tyče proti okolí při parabolickém průběhu oteplení je

$$\Delta\theta_s = \frac{2}{3} \Delta\theta$$

Na obr. 15 je podobná tyč, ale izolovaná tepelně tak, že tepelný tok (ztráty) může prostupovat k oběma koncům. Oteplení střední části tyče proti jejím okrajům můžeme určit tak, že tyč rozdělíme na dvě části o délkách $l/2$ se ztrátami $\Delta P/2$. Pro každou část můžeme použít rovnice (28), neboť platí pro jednosměrné proudění, takže dostaneme

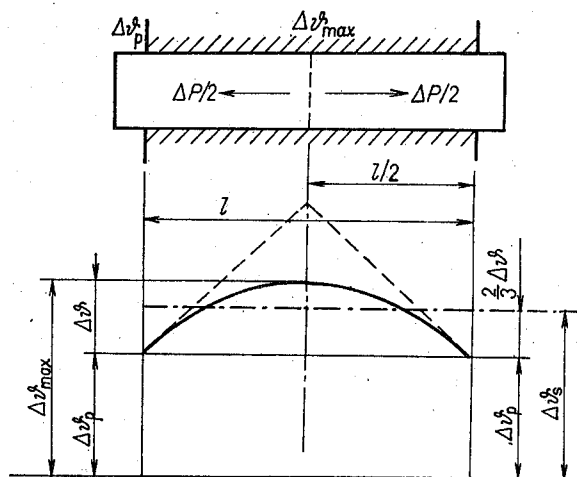
$$\Delta\theta = \frac{\frac{\Delta P}{2} \cdot \frac{l}{2}}{2\lambda S}$$

a po úpravě

$$\Delta\theta = \frac{\Delta Pl}{8\lambda S} \quad (29)$$

Průběh oteplení podél tyče je opět dán parabolou podle obr. 15. Oteplení, které se určí ze změny odporu, odpovídá jen střednímu oteplení

$$\Delta\vartheta_s = \frac{2}{3} \Delta\vartheta + \Delta\vartheta_p$$



Obr. 15. Průběh oteplení v aktivní tyči, chlazené z obou stran

Toto oteplení je menší než největší oteplení uprostřed. Proto se nesmí určovat oteplení ze změny odporu u strojů, jejichž osová délka je větší než 1 m.

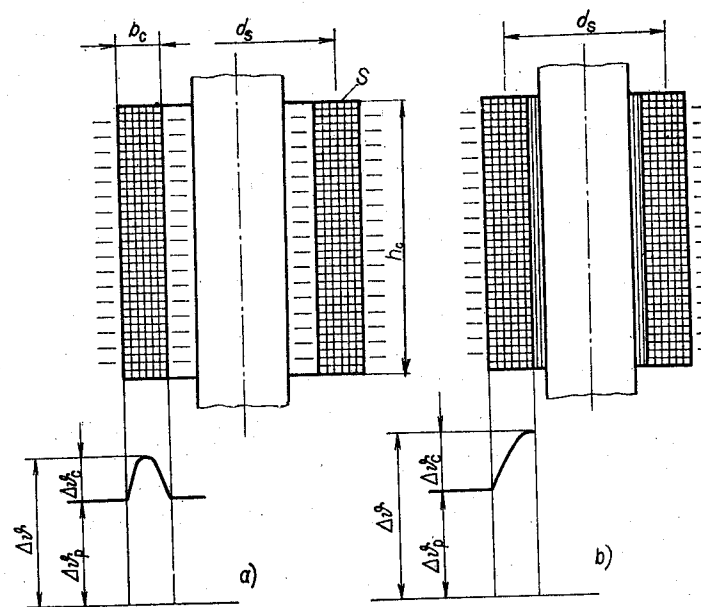
Podle obr. 15 je maximální oteplení uprostřed tyče dáno vztahem

$$\Delta\vartheta_{\max} = \Delta\vartheta + \Delta\vartheta_p \quad (30)$$

kde $\Delta\vartheta_p$ je oteplení okraje tyče vzhledem k okolí.

Rovnice (29) platí jen za předpokladu, že ochlazovací podmínky na obou okrajích tyče jsou stejné.

Příklad jednosměrného proudění představuje cívká podle obr. 16. Ztráty, které vznikají ve vodičích cívká, procházejí její hmotou k chladicímu povrchu. Jestliže zanedbáme přestup ztrát k čelným chladicím plochám, které jsou podstatně menší než obvodová chladicí plocha, potom pro výpočet teplotního spádu v cívkě s jedním chladicím povrchem (podle obr. 16b) platí rovnice (28) a pro výpočet teplotního spádu v cívkě se dvěma chladicími povrchy (vnitřní a vnější) podle obr. 16a platí rovnice (29).



Obr. 16. Průběh oteplení v cívkě:
a) chlazené z obou stran, b) chlazené z jedné strany

Jestliže do obou rovnic dosadíme za průřez $S = \pi d_s h_c$ a za $l = b_c$, potom pro cívká chlazenou jedním povrchem vyjde

$$\Delta\vartheta_c = \frac{\Delta P_j b_c}{2\pi d_s h_c \lambda_n} \quad (31)$$

a pro cívká chlazenou dvěma povrchy

$$\Delta\vartheta_c = \frac{\Delta P_j b_c}{8\pi d_s h_c \lambda_n} \quad (32)$$

kde λ_n je náhradní vodivost cívkového prostoru, určená podle rovnice (26) nebo (27),

ΔP_j jsou ztráty ve vinutí.

S ohledem na tento vnitřní teplotní spád nestačí určit pouze oteplení povrchu cívek. Zejména u cívek s větší tloušťkou vinutí může být oteplení uvnitř cívek podstatně větší.

1.4.10. Dovolené oteplení

Čím je dovolené oteplení větší, tím lépe je stroj využit. S velikostí oteplení souvisí životnost izolace. Je-li oteplení větší, je životnost podstatně kratší než při menších otepleních. Souvislost mezi oteplením a životností izolace není ještě přesně a úplně určena.

Z rozboru matematických vztahů pro životnost vychází, že při poklesu trvalé teploty asi o 6 až 8 K se prodlouží životnost izolace na dvojnásobek.

ČSN 340270 rozděluje izolanty podle jejich teplotní stálosti do těchto tříd:

Třída Y — mezní teplota 90 °C

Neimpregnované látky: bavlna, hedvábí, papír, dřevo, vlákniny z regenerované celulózy, vlákniny z acetátové celulózy, polyamidové vlákniny, lesklá lepenka, vulkanfibr apod. Při stavbě elektrických strojů se izolace třídy Y neuzívá.

Třída A — mezní teplota 105 °C

Jsou to izolanty třídy Y, pokud jsou impregnované nebo ponořené v tekutém dielektriku, např. v oleji. Dále to jsou lakované tkaniny z bavlny, hedvábí, regenerované celulózy, acetátu celulózy, polyamidu, lakovaný papír, stejně jako fólie z acetátu celulózy, fólie z acetobutyrátu celulózy, polyesterová pryskyřice síťovaná, email na dráty olejopryskyřičného typu a z polyamidové pryskyřice.

Třída E — mezní teplota 120 °C

Jsou to látky, u kterých můžeme dokázat, že jejich teplotní stálost dovoluje provoz při teplotě o 15 K vyšší, než je teplota látek třídy A. Např.: email na dráty z polyvinylformalových, polyuretanových a epoxidových pryskyřic, výlisky s celulóзовým plnivem, tvrzené tkaniny bavlněné, tvrzený papír, fólie z triacetátu celulózy apod.

Třída B — mezní teplota 130 °C

Skleněné vlákniny, azbest, lakované tkaniny ze skleněných vláken, lakovaný azbest, vrstvená listková slída, vrstvené skleněné tkaniny, vrstvený azbest, výlisky s minerálním plnivem, email na dráty z polyetyléntereftalátu apod.

Třída F — mezní teplota 155 °C

Slídové, azbestové a skleněné výrobky s anorganickými nosnými materiály, napouštěné v látce F, která snáší teploty o 25 K vyšší než izolace třídy B.

Třída H — mezní teplota 180 °C

Slídové, azbestové a skleněné výrobky, napouštěné silikonovými pryskyřicemi.

Třída C — mezní teplota nad 180 °C

Slída bez lepidla, porcelán, sklo, keramika, křemen. Mezní teploty jsou dány pro každý materiál zvlášť.

Dovolená oteplení elektrických strojů a přístrojů jsou uvedena v tab. 6.

Je nutno si pamatovat:

Průměrné dovolené oteplení izolace třídy A je 60 K a izolace třídy B pak 80 K.

Otázkou životnosti izolace v závislosti na oteplení se naše výzkumné ústavy trvale zabývají, neboť jde o velmi náročný a důležitý národohospodářský problém.

Pro běžně používané izolace předepisuje ČSN 35 0000 dovolené oteplení jednotlivých částí elektrických strojů a přístrojů. Předepsané údaje představují výsledky dlouholetých výzkumů v této oblasti. Můžeme je použít za předpokladu, že stroj nebude pracovat ve výšce větší než 1000 m nad mořem (řidší vzduch, horší odvod tepla) a že maximální teplota okolí a plyného chladiva nepřekročí 40 °C, popř. že teplota chladicí vody při vstupu do výměníku nebude vyšší než 25 °C.

Nejsou-li tyto podmínky dodrženy, musí se údaje dovoleného oteplení přiměřeně zmenšit.

Dovolená oteplení při chlazení vzduchem podle ČSN 35 0000 jsou uvedena v tab. 6. Norma kromě toho uvádí v dalších tabulkách oteplení při nepřímém chlazení vodíkem a při přímém chlazení aktivních částí stroje.

S dovoleným oteplením vinutí souvisí i dovolené oteplení ložisek. Podle ČSN 350000 je dovolené oteplení ložisek:

40 K pro kluzná ložiska;

40 K pro valivá ložiska s obyčejnými mazacími tuky;

50 K pro valivá ložiska s mazacími tuky s bodem skanutí 160 °C.

1.4.11. Způsoby chlazení točivých strojů

Úkolem chlazení je odvádět ztráty vznikající v aktivních částech elektrických strojů tak, aby oteplení jednotlivých částí nepřekročilo dovolené meze.

Základní způsoby chlazení jsou:

1. Nepřímé chlazení vzduchem; nejčastější způsob, vzduch odvádí teplo s povrchu aktivních částí i přes případnou izolaci na jejich povrchu.

2. Nepřímé chlazení vodíkem.

3. Přímé chlazení.

a) plynem (vzduch, vodík, hélium apod.);

b) kapalinou (voda, olej);

chladiivo proudí uvnitř aktivních částí, např. kanály uvnitř vodičů, takže přestup tepla je velmi intenzivní; vliv špatně vodivých izolovaných částí je téměř vyloučen.

Konkrétní použití různých způsobů chlazení je uvedeno v prvním dílu učebnice, při popisu jednotlivých druhů elektrických strojů.

Podle směru vzduchového proudu rozeznáváme chlazení:

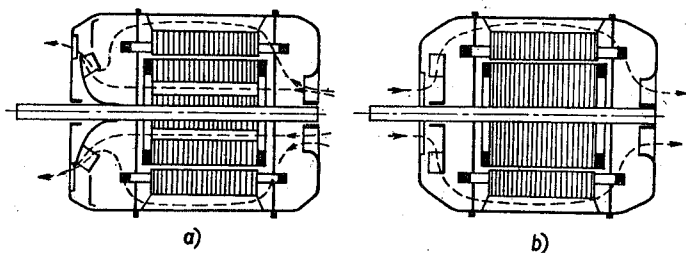
1. Axiální — vzduch proudí ve směru rovnoběžném s osou stroje.

2. Radiální — vzduch proudí ve směru kolmém k ose stroje.

Podle uspořádání ventilátorů ve stroji (obr. 17) rozeznáváme chlazení:

1. Nasávací — vzduch se nasává ze stroje a vyfukuje do prostředí.

2. Tlačné — vzduch se nasává z prostředí a protlačuje se ochlazovaným strojem.



Obr. 17. Chlazení točivých strojů:

a) nasávací, b) tlačné

Z obr. 17 je vidět, že při nasávacím chlazení je lépe chlazen rotor, takže toto chlazení vyhovuje pro dlouhé stroje s menším průměrem. U tlačného chlazení je naopak lépe chlazen stator, takže toto chlazení vyhovuje pro krátké stroje s větším průměrem. Výhoda nasávacího chlazení spočívá v tom, že odsává ze stroje prach a nečistoty. Používá se s výhodou u kroužkových motorů.

Podle počtu ventilátorů může být větrání jednostranné a dvoustranné.

Návrh chlazení

Návrh se skládá z těchto úloh:

1. Vyšetřit a lokalizovat jednotlivé ztráty ve stroji.

2. Stanovit plochy, kterými tepelný tok přestupuje.

3. Stanovit tepelnou vodivost materiálů, kterými tepelný tok přestupuje.

4. Správně odhadnout součinitele přestupu tepla.

5. Dostatečně dimenzovat tok chladiva s ohledem na tepelnou kapacitu a dovolené oteplení.

Využití chladiva je charakterizováno poměrem $\Delta P/Q$, který u vzduchem chlazených strojů bývá 20 až 30 kJ m⁻³.

Studium chlazení představuje dnes jednu z nezákladnějších a rozhodujících úloh při konstrukci zejména velkých elektrických strojů. Zabývají se jím vzduchotechnické laboratoře všech výrobních závodů a mnohé výzkumné ústavy.

1.4.12. Návrh ventilátoru pro točivý stroj

Pro větrání malých a středních motorů se obvykle používají radiální ventilátory se stejnými lopatkami, které umožňují stejné chlazení při obou směrech točení.

Statický tlak (tlaková výška) radiálního ventilátoru se stejnými lopatkami je dána vztahem

$$H_0 = D_2^2 n^2 \psi \cdot 10^{-3} \quad [\text{Pa}; \text{m}, \text{ot}/\text{min}, -] \quad (33)$$

kde D_2 je vnější průměr ventilátoru (obr. 18),

n otáčky ventilátoru,

ψ funkce poměru D_1/D_2 a počtu lopatek z , vynesena na obr. 18.

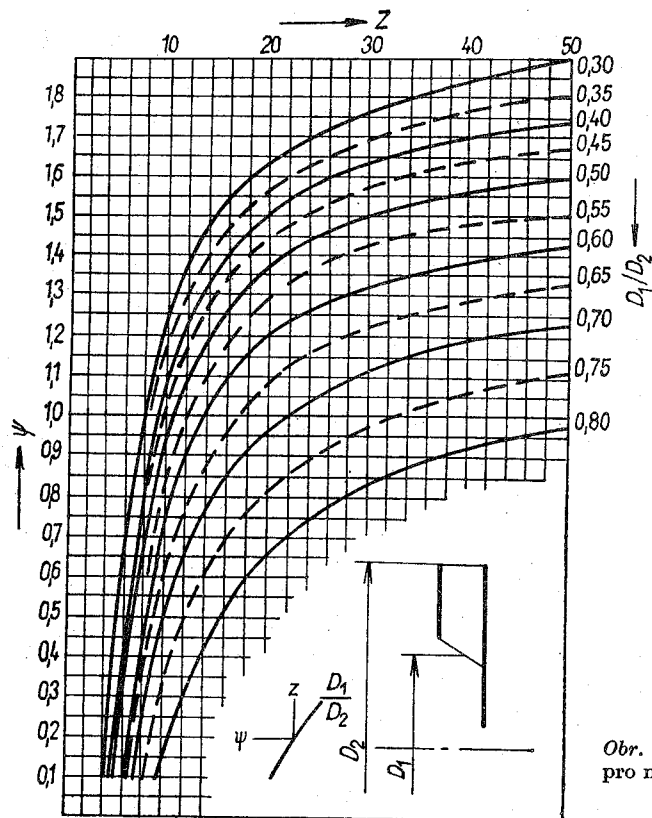
Normální rozměry ventilátorů s rovnými lopatkami jsou uvedeny v ČSN 35 0956.

Vnější průměr D_2 se přibližně rovná vnějšímu průměru statorových plechů d_e .

Statický tlak ventilátoru H_0 je potřebný k protlačení určitého množství chladicího vzduchu Q přes hydraulický odpor, který představují jednotlivé ventilační kanály. Závislost statického tlaku na množství vzduchu je dána vztahem

$$H_0 = kQ^2 \quad [\text{Pa}; \text{Ns}^2\text{m}^{-8}, \text{m}^3\text{s}^{-1}] \quad (34)$$

kde k je hydraulický odpor, který závisí na geometrických rozměrech a uspořádání cest, kterými vzduch ve stroji prochází.



Obr. 18. Nomogram pro návrh ventilátoru

Tento odpor je možné vyjádřit [2] pro malé a střední stroje v závislosti na vnějším průměru statorových plechů

$$k = 250d_0^{-4} \quad [\text{N s}^2 \text{ m}^{-8}; \text{m}] \quad (35)$$

Množství vzduchu potřebné k odvedení ztrát ΔP_v je dáno vztahem

$$Q = \frac{\Delta P_v}{\Delta \vartheta_v c_p} \quad [\text{m}^3 \text{ s}^{-1}; \text{W, K, J K}^{-1} \text{m}^{-3}] \quad (36)$$

kde $\Delta \vartheta_v$ je dovolené oteplení vzduchu při průchodu strojem (obvykle 20 K), c_p měrné teplo vzduchu za stálého tlaku.

Pro obvyklé tlaky a teploty je

$$c_p = 1228 \text{ J K}^{-1} \text{m}^{-3}$$

Jestliže do rovnice (36) dosadíme příslušné údaje, zjednoduší se na tvar

$$Q = \frac{\Delta P_v}{20 \cdot 1228} = 0,0408 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta P_v \quad [\text{m}^3 \text{ s}^{-1}; \text{W}] \quad (37)$$

nebo přibližně

$$Q \doteq 40 \Delta P_v \quad [\text{l s}^{-1}; \text{kW}] \quad (38)$$

Z toho vyplývá, že na 1 kW ztrát je potřeba 40 litrů vzduchu za sekundu.

Výraz ΔP_v představuje ty ztráty, které se musí odvést ventilací. Jsou to tedy ztráty motoru, zmenšené o ztráty v ložiskách, které se odvádějí povrchem ložiskových štítů. Za předpokladu, že ložiskové ztráty tvoří třetinu mechanických ztrát, bude

$$\Delta P_v = \Delta P - \frac{1}{3} \Delta P_m \quad (39)$$

Při návrhu postupujeme tak, že pro určité množství vzduchu Q a hydraulický odpor k se vypočte potřebný statický tlak H_0 , vhodný vnější průměr ventilátoru se určí z výkresu a zaokrouhlí se na normalizovaný průměr. Z rovnice (33) se vypočte hodnota funkce ψ a z diagramu na obr. 18 se určí vyhovující počet lopatek a poměr D_1/D_2 .

Přesný návrh ventilace je složitý, zejména pokud jde o přesné určení celkového hydraulického odporu všech vzduchových cest. Obvykle při tom spoléháme na výsledky laboratorních měření na modelech nebo prototypch.

Příklad návrhu ventilace je uveden spolu s komplexním návrhem indukčního motoru.

1.4.13. Kontrolní otázky

1. Jaké druhy zatížení rozlišuje ČSN 350000?
2. Co je to součinitel přestupu tepla a v čem se udává? Na čem závisí?
3. Jaký je průměrný součinitel přestupu tepla pro průměrné oteplení 50 K při chlazení vzduchem? Jakou má velikost při chlazení olejem?
4. Jaký tvar má základní rovnice platící pro ustálený stav při trvalém zatížení? Z jaké podmínky vznikla?
5. Jakými způsoby odvádíme teplo do vzduchu? Kde se jednotlivé způsoby uplatní?
6. Proč jsou dráty lépe chlazené než rovná plocha?
7. Jaké mají být minimální rozměry chladicích kanálů?
8. Co a z jaké rovnice je třeba navrhnout při trvalém zatížení, jestliže je předepsáno dovolené oteplení?
9. Proč musí mít velké stroje oběžné chlazení?

10. Kdy uvažujeme při tepelných výpočtech krátkodobé zatížení? Jaký je základní vztah a z jaké podmínky byl odvozen?

11. Co je to měrné teplo a v čem se udává? Uveďte jeho velikost pro měď a hliník.

12. Co a jak se dimenzuje při krátkodobém zatížení, jestliže je předepsáno dovolené oteplení?

13. Jaký je průběh oteplování? Co je časová konstanta a na čem závisí?

14. Jaký je průběh ochlazování? Kdy je časová konstanta větší; je-li stroj v chodu nebo v klidu?

15. Co je to časový výkon? Jak se udává výkon trakčních motorů?

16. Kdy uvažujeme přerušovaný chod a co je jeho charakteristickým údajem?

17. Pro jaké zatěžovatele se obvykle elektrická zařízení navrhnou?

18. Jak se určí ekvivalentní trvalý výkon stroje s přerušovaným zatížením?

19. Čím se liší přerušované zatížení od přerušovaného chodu?

20. Jaký je průběh oteplení tělesa při jednosměrném proudění?

21. Jak počítáme tepelnou vodivost homogenního tělesa? Co je to měrná tepelná vodivost a v čem se udává?

22. Jak se dá určit teplotní spád, potřebný pro přestup ztrát z aktivního materiálu přes izolaci?

23. Co je to náhradní tepelná vodivost a jak ji určujeme?

24. Jaký vliv na oteplení má impregnace izolace?

25. Jaký je průběh oteplení při jednosměrném proudění v aktivní látce?

26. Jak určujeme oteplení povrchu cívk velké tloušťky?

27. Jaké jsou třídy teplotní stálosti izolantů?

28. Které jsou moderní izolanty s velkou teplotní odolností?

29. Jak souvisí životnost izolace s teplotou?

30. Jaká jsou průměrná dovolená oteplení běžně užívaných izolací?

31. Jaké jsou způsoby chlazení elektrických strojů točivých?

32. V čem spočívá návrh chlazení elektrických strojů?

33. Jaký je postup zjednodušeného návrhu ventilátoru pro točivý stroj?

1.5. MECHANICKÝ NÁVRH ELEKTRICKÝCH STROJŮ TOČIVÝCH

1.5.1. Návrh hřídele

Hřídel se předběžně navrhne a potom se mechanicky kontroluje. Podle výsledku se návrh případně poopraví.

Vycházíme z normalizovaných rozměrů volného konce hřídele (tab. 7). Průměr ložiskového čepu bývá asi o stupeň větší. Za ložiskem je průměr

Tabulka 7. Rozměry volného konce hřídele pro elektrické stroje točivé podle ČSN 35 0040 (obr. 24)

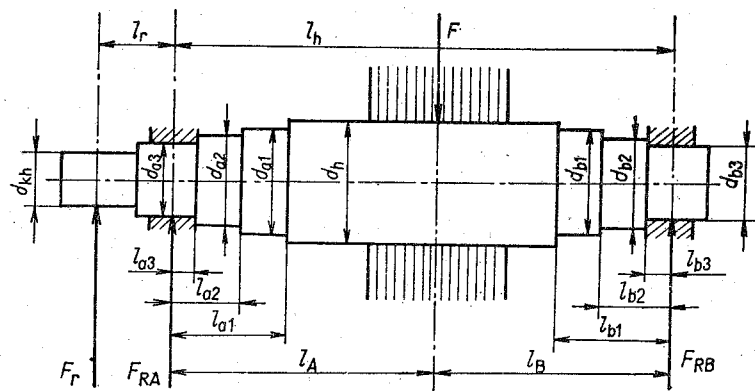
Průměr <i>d</i> [mm]	délka <i>l</i> [mm]		Průměr <i>d</i> [mm]	délka <i>l</i> [mm]	
	dlouhé	krátké		dlouhé	krátké
7	16	—	140	250	200
9	20	—	(150)		
11	23	20	160	300	240
14	30	25	(170)		
16	40	28	180		
18			(190)	350	280
19			200		
22	50	36	220		
24			(240)	410	330
28	60	42	250		
32	80	58	(260)		
38			280	470	380
42	110	82	(300)		
78			320		
55			(340)	550	450
60	140	105	360		
65			(380)		
70			8 400	650	540
75			(420)		
80	170	130	(440)		
85			450		
90			(460)		
95			(480)		
100	210	165	500		
110			(530)	800	680
(120)			560		
125			(600)		
(130)	250	200	630		

Průměry v závorkách se nedoporučují

opět o stupeň větší a dále podle velikosti motoru, jednou nebo několikrát odstupňovaný až k maximálnímu průměru pod rotorovými plechy.

Hřídel musí být tak pevný, aby jeho prohnutí nepřekročilo 1/10 vzduchové mezery. Proto bývají jeho průměry obvykle větší, než jaké vycházejí z výpočtu jen s ohledem na pevnost v ohybu a krutu. Proto se na ohyb a krut kontroluje jen volný konec hřídele.

Hlavní rozměry hřídele jsou vyznačeny na obr. 19.



Obr. 19. Hlavní rozměry hřídele

Jmenovitý moment přenášený volným koncem

$$M = 9550 \frac{P}{n} \quad [\text{Nm}; \text{kW}, \text{ot}/\text{min}] \quad (40)$$

Je-li na něm nasazena spojka, je maximální napětí v krutu při momentu zvratu

$$\tau_k = \frac{M_{\max}}{W_k} = \frac{M_{\max}}{M_n} \cdot \frac{16M \cdot 10^3}{\pi d_{kh}^3} \quad [\text{MPa}; \text{Nm}, \text{mm}] \quad (41)$$

příčměž momentová přetížitelnost M_{\max}/M_n se dá pro kroužkové stroje a pro stroje s jednoduchou klecí číst přibližně z kruhového diagramu.

Při použití řemenice je nebezpečný průřez v ose zadního ložiska namáhán na ohyb i na krut.

Napětí v krutu je dáno vztahem

$$\tau_k = \frac{M_{\max}}{M_n} \cdot \frac{16M \cdot 10^3}{\pi d_A^3} \quad (42)$$

a napětí v ohybu při přetížení

$$\sigma_o = \frac{M_{o\max}}{W_o} = \frac{M_{\max}}{M_n} \cdot \frac{32F_r l_r}{\pi d_A^3} \quad [\text{MPa}; \text{N}, \text{mm}, \text{mm}] \quad (43)$$

kde F_r je maximální tah řemene,

l_r vyložení volného konce podle obr. 19.

Výsledné napětí v průřezu ložiskového čepu

$$\sigma = \sqrt{\sigma_o^2 + 4\tau_k^2} \quad (44)$$

Pro ocel 11 521,1 s pevností 520 až 640 MPa se maximálně dovoluje

$$\sigma_D = 80 \text{ MPa}$$

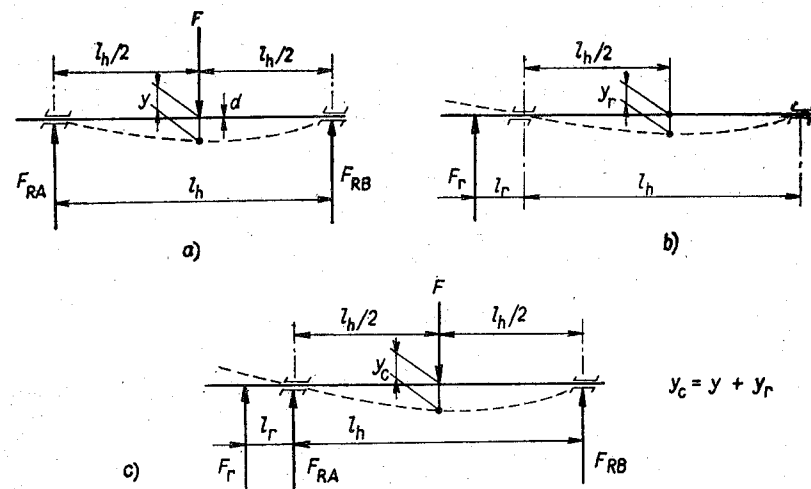
Tah řemene u motoru se určí pro minimálně přípustný průměr řemenice d_r , který závisí na otáčkách a na výkonu.

Výsledný tah řemene se rovná pětinašobku obvodové síly

$$F_r = 5 \frac{2M}{d_r} \quad [\text{N}; \text{Nm}, \text{m}] \quad (45)$$

kde rameno síly je $d_r/2$.

Prohnutí hřídele se určuje matematicky nebo graficky.



Obr. 20. Jednoduchý případ namáhání hřídele: a) jedním zatížením, b) řemenicí, c) výsledné prohnutí

Síla F soustředěná ve středu hřídele stejného průřezu (obr. 20a), vyvolá průhyb

$$y = \frac{Fl_h^3}{48EJ} \quad [\text{mm}; \text{N}, \text{mm}, \text{MPa}, \text{mm}^4] \quad (46)$$

V případě řemenového převodu musíme počítat i s průhybem od tahu řemene, který uprostřed hřídele je

$$y_r = 3y \cdot \frac{l_r F_r}{l_h F} \quad (47)$$

Nejméně příznivý je tah směrem nahoru (obr. 20b), kdy se oba průhyby sečítají (obr. 20c)

$$y_c = y + y_r \quad (48)$$

Součin EJ je tzv. tuhost průřezu,

kde E je modul pružnosti v tahu (pro běžnou ocel je to 220 000 MPa),
 J moment setrvačnosti průřezu; pro kruhový průřez

$$J = \frac{\pi d^4}{64} \quad [\text{mm}^4; \text{mm}] \quad (49)$$

Na hřídel motoru působí tíha rotoru s vinutím, tíha ventilátoru, tíha samotného hřídele, u kroužkového motoru i tíha kroužků a magnetický tah, vyvolané případnou excentricitou rotoru vzhledem k statoru.

Výstřednost (excentricita) závisí na přesnosti výroby, na vůli v ložiskách a na samotném prohnutí hřídele. Vzhledem k poměrně malé vzduchové mezeře nesmí výstřednost být větší než jedna desetina vzduchové mezery, tzn.

$$\varepsilon = \frac{e}{\delta} \leq 0,1$$

Při výstřednosti ε je magnetický tah

$$F_\varepsilon = \frac{80}{3} \cdot \pi dl_e B_s^2 \varepsilon \cdot 10^4 \quad [\text{N}; \text{m}, \text{m}, \text{T}, -] \quad (50)$$

U větších motorů se jednotlivé síly ponechávají ve svých působících místech a průhyb se určí graficky jako moment momentové plochy, dělený tuhostí průřezu. Hřídel s proměnným průřezem se redukuje na hřídel se stálým průřezem tak, že jednotlivé úseky momentových ploch se přepočítají v poměru

$$\frac{J_{\max}}{J_{\text{skut}}}$$

U menších motorů se řešení zjednodušuje a tíha rotoru u klece přibližně

$$G = mg = \frac{\pi d^2}{4} \cdot l \gamma g \quad [\text{N}; \text{kg}, \text{m s}^{-2}; \text{m}, \text{m}, \text{kg m}^{-3}, \text{m s}^{-2}] \quad (51)$$

se sečte s magnetickým tahem, výsledná síla

$$F = G + F_\varepsilon \quad (52)$$

se nechá působit ve středu rotoru a jí vyvolaný průhyb se určí přibližně (obr. 19) počítáním samostatně z obou stran.

Průhyb počítaný z levé strany je

$$y_A = \frac{64F}{3\pi E} \cdot \frac{l_B}{l_h} \left(\frac{l_A^3 - l_{a1}^3}{d_h^4} + \frac{l_{a1}^3 - l_{a2}^3}{d_{a1}^4} + \frac{l_{a2}^3 - l_{a3}^3}{d_{a2}^4} + \dots + \frac{l_{an}^3}{d_{an}^4} \right) \quad (53)$$

a podobně průhyb počítaný z pravé strany

$$y_B = \frac{64F}{3\pi E} \cdot \frac{l_A}{l_h} \left(\frac{l_B^3 - l_{b1}^3}{d_h^4} + \frac{l_{b1}^3 - l_{b2}^3}{d_{b1}^4} + \frac{l_{b2}^3 - l_{b3}^3}{d_{b2}^4} + \dots + \frac{l_{bn}^3}{d_{bn}^4} \right) \quad (54)$$

Pokud nejsou oba průhyby příliš rozdílné, je možné určit skutečný průhyb jako střední hodnotu

$$y = \frac{y_A + y_B}{2} \quad (55)$$

Bude-li velký rozdíl mezi průhyby y_A a y_B , musíme zkusmo posouvat působíště síly F tak, aby oba průhyby byly stejné.

Kritické otáčky, při kterých dochází vzhledem k rezonanci ke zvětšování průhybu až k porušení hřídele nebo zadření motoru, můžeme určit ze zjednodušené rovnice

$$n_k = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g}{y_{\max}}} \quad (56)$$

nebo jestliže dosadíme $g = 9810 \text{ mm s}^{-2}$

$$n_k = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{9810}{y_{\max}}} = \frac{950}{\sqrt{y_{\max}}} \quad [\text{ot/min}; \text{mm}] \quad (57)$$

Provozní otáčky se musí od kritických lišit minimálně o $\pm 20 \%$.

Jestliže platí

$$\begin{aligned} n < n_k, & \text{ jde o hřídel tuhý,} \\ n > n_k, & \text{ jde o hřídel poddajný.} \end{aligned}$$

Poznámka.

Při známé síle a známém rozpětí hřídele l_h můžeme minimální průměr hřídele pod rotorem přibližně odhadnout z rovnice (46)

$$J = \frac{Fl_h^3}{48Ey} \quad (58)$$

a tomu odpovídá průměr

$$d_h = \sqrt[4]{\frac{64J}{\pi}} \quad (59)$$

přičemž se za průhyb y dosadí jedna desetina vzduchové mezery.

U řemenového převodu je nutno tento průměr zvětšit.

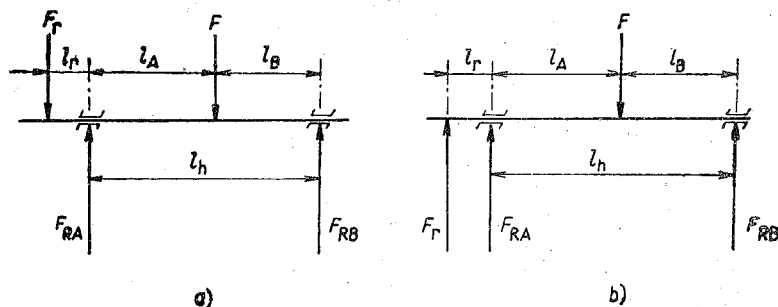
Dovolená lícování volného konce hřídele jsou podle ČSN 35 0049.

Průměr hřídele	Lícování	
	hřídele	náboje
6 až 50 mm	j6	H7
50 až 120 mm	k6	
120 až 650 mm	m6	

1.5.2. Návrh ložiska

Malé a střední stroje mají obvykle valivá ložiska kuličková nebo válečková.

U velkých strojů jsou výhodnější kluzná pánvová ložiska, která mají tišší chod a v případě poruchy je možno je opravit ve vlastních dílnách. Skladování náhradních valivých ložisek velkých rozměrů a málo obvyklých průměrů je neekonomické.



Obr. 21. Určení reakcí v ložiskách:

a) v zadním ložisku, tah řemene dolů, b) v předním ložisku, tah řemene nahoru

Konstrukční uspořádání ložisek je uvedeno v prvním dílu učebnice při popisu jednotlivých strojů.

Pro návrh ložisek musíme znát jejich reakce. Nejméně příznivé namáhání je v zadním ložisku. Reakce od síly F je dána vztahem

$$F_{RA} = \frac{Fl_B}{l_h} \quad (60)$$

U řemenového pohonu je reakce zvětšená tahem řemene, jestliže náhodou působí směrem dolů (obr. 21a)

$$F_{RA} = \frac{Fl_B + F_r(l_h + l_r)}{l_h} \quad (61)$$

Návrh valivých ložisek je podrobně uveden v ČSN 024607. Při návrhu se vychází z požadované trvanlivosti ložiska L_h , která bývá

13 000 až 20 000 hodin při osmihodinovém provozu bez plného využití stroje, 20 000 až 30 000 hodin při osmihodinovém provozu a plně využitém stroji, 45 000 až 60 000 hodin pro stroje s trvalým provozem, 100 000 až 200 000 hodin pro zvlášť důležité provozy.

Součinitel trvanlivosti je

$$f_h = \sqrt[3]{\frac{L_h}{500}} \quad (62)$$

a činitel otáček

$$f_n = \frac{1}{\sqrt[3]{0,03n}} \quad (63)$$

Dynamická únosnost ložiska je potom

$$C = \frac{f_h}{f_n} \cdot F_{RA} \quad [N] \quad (64)$$

a podle ní se pro předběžně zvolený průměr čepu určí z katalogu výrobce vhodný typ ložiska.

Přední ložisko je potom asi o stupeň menší, nebo se přesně určí z reakce v předním ložisku, která je u řemenového převodu největší tehdy, když tah řemene působí nahoru (obr. 21b).

$$F_{RB} = \frac{Fl_A + F_r l_r}{l_h} \quad (65)$$

Poznámka. Návrh kluzného ložiska je uveden v [3].

1.5.3. Závěsná oka

Točivé stroje o hmotnosti nad 30 kg musí mít pro zdvihání závěsné oko se závitem. Musí odpovídat ČSN 021369.

1.5.4. Mechanické namáhání klínů rotorových drážek

Klín rotorové drážky kontrolujeme na namáhání odstředivou silou. Představuje nosník o rozpětí b (obr. 22) namáhaný rovnoměrně rozloženým břemenem, daným odstředivou silou, působící na vinutí v drážce.

Jestliže na jednotku délky připadá odstředivá síla F_1 , platí

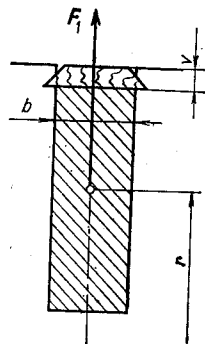
$$\frac{F_1 b}{8} = \sigma_0 \frac{v^2}{6}$$

a z toho vypočteme napětí v ohybu

$$\sigma_0 = F_1 \frac{3b}{4v^2} \quad [\text{MPa}; \text{N}, \text{mm}, \text{mm}] \quad (66)$$

kde b je šířka klínu (obr. 22),

v výška klínu.



Obr. 22. Namáhání drážkového klínu odstředivou silou

Hmotnost vodičů na 1 mm délky

$$m_1 = n_{d2} S_2 \gamma \cdot 10^{-3} \quad [\text{kg}; \text{—}, \text{m}^2, \text{kg m}^{-3}] \quad (67)$$

a této hmotnosti odpovídá odstředivá síla, vypočtená pro 20% zvětšení otáček

$$F_1 = m_1 r (1,2 \cdot \omega)^2 \quad [\text{N}; \text{kg}, \text{m}, \text{rad s}^{-1}] \quad (68)$$

kde n_{d2} je počet vodičů v rotorové drážce,
 S_2 průřez rotorového vinutí,
 γ měrná hmotnost materiálu (Cu, Al),
 r vzdálenost těžiště od osy rotoru.

Dovolené napětí v ohybu závisí na použitém materiálu a je:

4,5 MPa pro habrové dřevo impregnované;
6,0 MPa pro bukové dřevo impregnované;
20,0 MPa pro tvrzenou bavlněnou tkaninu;
10,0 MPa pro tvrzenou tkaninu skleněnou;
15,0 MPa pro tvrzený papír;
8,0 MPa pro fibr.

Normální tvary drážkových klínů podle oborové normy ON 35 0935 jsou na obr. 71.

Délka klínu nebo celková délka klínů v jedné drážce se určí podle délky rotorového svazku, přičemž se doporučuje, aby klín přesahoval délku svazku o

10 mm při délce svazku do 100 mm;
12 až 14 mm při délce svazku nad 100 mm.

Délka jednotlivých klínů nemá být větší než
200 mm pro výšku klínů od 2,5 do 3,5 mm;
250 mm pro výšku klínů od 4,0 do 5,0 mm.

Ve výrobních podkladech se drážkový klín označuje těmito údaji: tvar, šířka \times délka, materiál (popř. číslo normy materiálu — pokud existuje) a číslo oborové normy ON 35 0935.

Příklad:

Klín D 9,5 \times 110, tvrzená tkanina ČSN 644512 — ON 350935.

Poznámka. U zvláště namáhaných strojů se kromě namáhání vlastního drážkového klínu kontroluje i měrný tlak ve styčné ploše mezi klínem a jeho uchycením v drážce, popř. i namáhání rotorového zubu silou, kterou působí klín na rotorový zub.

1.5.5. Návrh bandáže pro rotorové vinutí

Proti účinkům odstředivé síly jsou čela rotorových vinutí zajištěna bandážemi. Bandáže jsou běžně zhotoveny z pocínovaného ocelového nebo bronzoového drátu o průměru 0,5 až 3,0 mm, který se navine na izolační podložku z lesklé lepenky, leatheroidu nebo mikanitu. Aby se během bandážování

zajistila konstantní napínací síla, používají se různé konstrukce bandážovacích strojů.

Velké a rychloběžné stroje mají místo drátové bandáže na čelech vinutí nasunuty masivní bandážovací kruhy z nemagnetické oceli.

V zahraničí se od roku 1959 zavádějí bandáže ze skleněné pásky, napouštěné tvrditelnými pryskyřicemi, která pod názvem Res-i-glas se vyrábí jedině v USA a do Evropy se dováží prostřednictvím firmy Micafil. Pevnost bandáže je až 2000 MPa.

Bandážovací páska se na čela vinutí navine na zvláštním bandážovacím stroji s předepsaným napětím a spolu s rotorem se vytvrdí při teplotě 135 °C až 150 °C. Tím vznikne souvislá kompaktní bandážovací manžeta, která kromě jiného vylučuje možnost poškození vinutí náhodným uvolněním bandážovacích drátů, ke kterému někdy, zejména při přetěžování motoru, dochází.

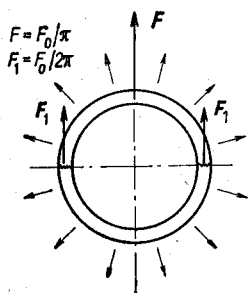
Bandáž se mechanicky dimenzuje na odstředivou sílu, působící na hmotnost rotorových čel m_{ϵ} na jedné straně motoru při otáčkách zvětšených o 20 %

$$F_o = m_{\epsilon} r_{\epsilon} \left(1,2 \frac{2\pi n}{60} \right)^2 \quad [\text{N}; \text{kg}, \text{m}, \text{ot}/\text{min}] \quad (69)$$

Tato síla je rovnoměrně rozložena po obvodu. Její průmět do osového směru je

$$F = \frac{F_o}{\pi}$$

a průřez bandáže je namáhaný poloviční silou (obr. 23)



$$F_1 = \frac{F}{2} = \frac{F_o}{2\pi} = \frac{m_{\epsilon}}{2\pi} r_{\epsilon} \left(1,2 \frac{2\pi n}{60} \right)^2$$

Obr. 23. Určení síly namáhající bandáž vinutí

a po úpravě

$$F_1 = \frac{m_{\epsilon}}{570} r_{\epsilon} (1,2n)^2 \quad [\text{N}; \text{kg}, \text{m}, \text{ot}/\text{min}] \quad (70)$$

kde r_{ϵ} je poloměr kružnice jdoucí středem drážky,
 n jmenovité otáčky.

Bandáž má n_b drátů o průřezu S_b a odstředivá síla způsobí v jednom průřezu bandážovacího drátu napětí

$$\sigma = \frac{F_1}{n_b S_b} \quad (71)$$

Obvykle se volí průřez drátu S_b a potřebný počet závitů bandáže se potom vypočítá ze vztahu

$$n_b = \frac{F_1}{\sigma_D S_b} \quad [-; \text{N}, \text{MPa}, \text{mm}^2] \quad (72)$$

Dovolené napětí σ_D volíme podle údajů výrobce použitého bandážovacího drátu; pro ocelový drát je asi 150 MPa.

1.5.6. Konstrukční vypracování elektrických strojů točivých

O celkovém provedení elektrického točivého stroje rozhodují kromě elektrických, tepelných a mechanických kritérií ještě tyto požadavky:

- předepsané krytí;
- předepsaný tvar;
- předepsané montážní rozměry;
- mezní úchytky a předepsaná drsnost povrchu.

Krytí a tvary elektrických strojů byly již uvedeny v prvním dílu učebnice.

Základní montážní rozměry elektrických strojů točivých předepisuje ČSN 350040 a pro dva základní tvary (patkový a přírubový) jsou uvedeny na obr. 24 a v tab. 8a a 8b. V téže normě jsou předepsány i rozměry volného konce hřídele, potřebné pro počáteční návrh hřídele a ložisek. Uvedeny jsou v tab. 7 na str. 63.

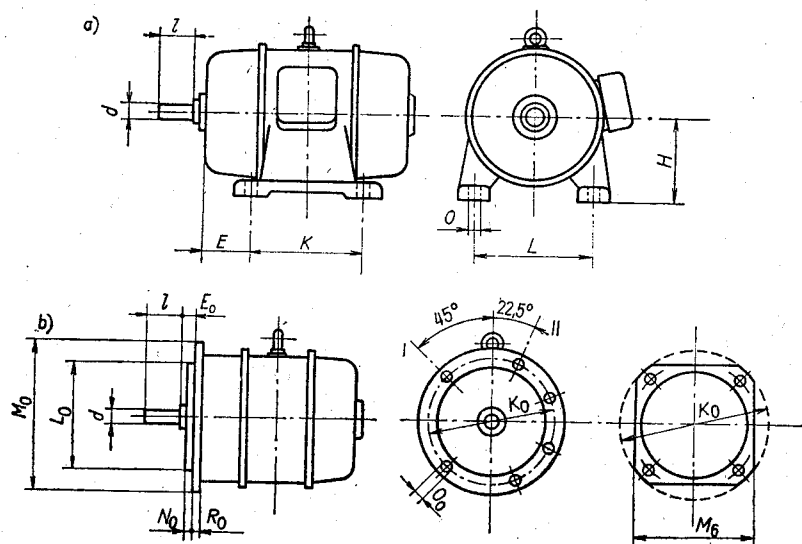
Rozměry svorkovnic a jejich krytů nejsou dosud u nás normalizovány.

Do dílenských výkresů navržených strojů je nutné vyznačit:

- mezní úchytky radiálních rozměrů;
- mezní úchytky délkových rozměrů;
- drsnost povrchu;

podle údajů uvedených v normě ON 35 0050, která platí pro stroje od 0,6 kW do 1000 kW.

Poznámka k mechanickému návrhu. Mechanický návrh musí probíhat současně s konstrukcí stroje. Při konstrukci se musí dodržet normalizované montážní rozměry podle typové velikosti stroje.



Obr. 24. Základní montážní rozměry točivých strojů (tab. 8):
a) patkový stroj, b) přírubový stroj

Tabulka 8a. Základní montážní rozměry patkových strojů podle ČSN 35 0040 (obr. 24a)

Označení velikosti stroje	E	H	K	L	O	Závit upevňovacího šroubu
40	25	40	50	63	4,8	M 4
45	28	45	55	70		
50	32	50	63	80	5,8	M 5
56	36	56	71	90		
63	40	63	80	100	7	M 6
71	45	71	90	112		
80	50	80	100	125	10	M 8
90 S	56	90	100	140	10	M 8
90 L			125			
100 S	63	100	112	160	12	M 10
100 L			140			
112 S	70	112	114	190		
112 M			140			
(112 L)			159			
132 S	89	132	140	216		
132 M			178			
(132 L)			203			
160 S)	108	160	178	254	15	M 12
160 M			210			
160 L			254			
180 S	121	180	203	279		
180 M			241			
180 L			279			
200 S	133	200	228	318	19	M 16
200 M			267			
200 L			305			
225 S	149	225	286	356		
225 M			311			
(225 L)			356			

1.5.7. Kontrolní otázky

1. Z jakých podmínek se vychází při návrhu hřídele?
2. Odvoďte základní vztah mezi výkonem a točivým momentem.
3. Jak kontrolujeme namáhání volného konce hřídele při použití spojky?
4. Jak kontrolujeme namáhání volného konce hřídele při nasazené řemenici?
5. Jak určujeme průhyb hřídele a pro jakou excentricitu hřídele se počítá?
6. Co jsou to kritické otáčky a jak se počítají? Kdy mluvíme o tuhém a kdy o poddajném hřídeli?
7. Jak můžeme odhadnout pro první návrh minimální průřez hřídele pod rotorem?
8. Jakými kritérii se musíme řídit při volbě druhu ložiska?

Tabulka 8a — pokračování 1

Označení velikosti stroje	E	H	K	L	O	Závit upevňovacího šroubu
250 S 250 M (250 L)	168	250	311 349 406	406	24	M 20
280 S 280 M (280 L)	190	280	368 419 457	457		
315 S 315 M (315 L)	216	315 457	406 457 508	508	28	M 24
355 S 355 M 355 L	254	355	500 560 630	610		
400 S 400 M 400 L	280	400	560 630 710	686	35	M 30
450 S 450 M 450 L	315	450	630 710 800	750		
500 S 500 M 500 L	335	500	710 800 900	850		
560 S 560 M 560 L	355	560	800 900 1000	950	42	M 36
630 S 630 M 630 L	375	630	900 1000 1120	1060		

Rozměry volného konce hřídele jsou v tab. 7
Číslo velikosti udává zároveň výšku osy H [mm]
Význam označení: S — krátký stroj, M — středně dlouhý stroj, L — dlouhý stroj
Velikosti v závorce se nedoporučují

Tabulka 8b. Základní montážní rozměry přírubových strojů podle ČSN 35 0040 (obr. 24b)

Označení velikosti stroje	E ₀	K ₀	L ₀	M ₀	N ₀	O ₀			M ₆ nej- méně	R ₀ nej- méně
						počet děr	prů- měr díry	závit		
F 40	0	40	25	48	1,5	4	3,6	M 3	35	4
F 45		45	32	56						
F 50		50	36	63	2			4,8	M 4	45
F 55 (F 60)		55 60	40 45	70 75	2,5			5,8	M 5	50 55
F 65 F 75		65 75	50 60	80 90						60 65
F 85		85	70	105				7	M 6	75
F 100		100	80	120	3					90
F 115		115	95	140				10	M 8	105
F 130		130	110	160	3,5					115
(F 145) F 165		145 165	120 130	175 200				12	M 10	130 145
(F 185) F 215 F 265		185 215 265	150 180 230	220 250 300	4			15	M 12	160 190 230
F 300		300	250	350	5			19	M 16	270
F 350		350	300	400		8				—
F 400		400	350	450						
F 500		500	450	550						22
F 600 F 740		600 740	550 680	660 800	6			24	M 20	25
F 940 F 1080		940 1080	880 1000	1000 1150				28	M 24	30

Rozměry volného konce hřídele jsou v tab. 7
Číslo velikosti udává zároveň průměr roztečné kružnice děr v přírubě stroje
Velikosti v závorce se nedoporučují

9. Jaký je postup při návrhu valivého ložiska?
10. Co rozumíme trvanlivostí ložiska?
11. Jak kontrolujeme namáhání drážkového klínu odstředivou silou?
12. Co je to Res-i-glas?
13. Jak určíme sílu namáhající bandáž rotorového vinutí?
14. Jakým způsobem se dimenzuje rotorová drátová bandáž?

2. VINUTÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ TOČIVÝCH

2.1. STEJNOSMĚRNÁ VINUTÍ

2.1.1. Základní pojmy

Základní druhy stejnosměrných vinutí a jejich typické vlastnosti jsou vysvětleny a stručně popsány v prvním dílu této učebnice.

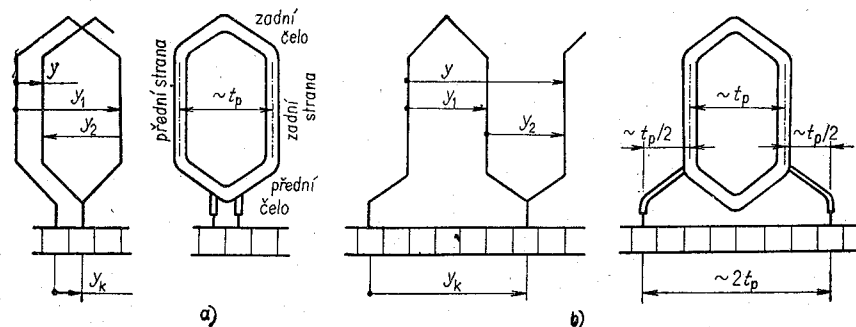
Všechna stejnosměrná vinutí jsou dnes výhradně dvouvrstvová. Podle připojení cívek ke komutátoru jsou v zásadě buď smyčková, nebo vlnová.

Při návrhu vinutí se používá těchto názvů a označení:

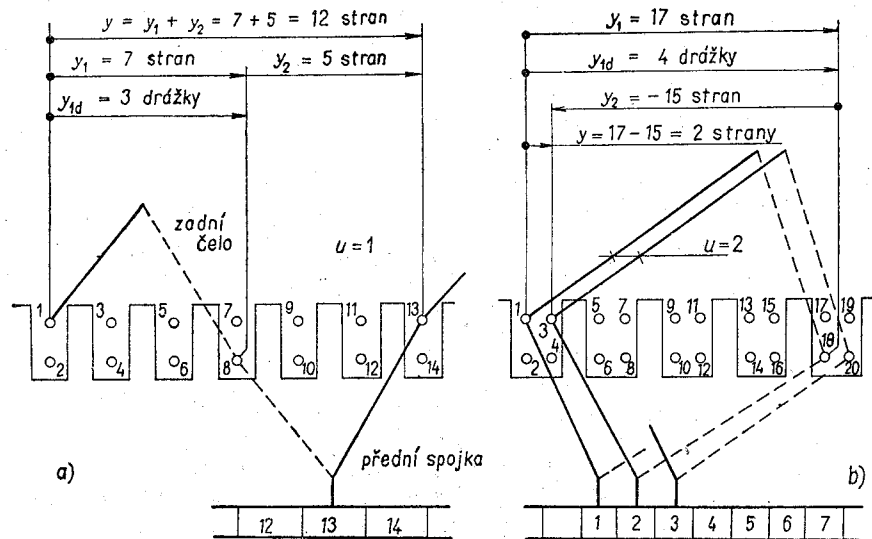
$2p$	počet pólů
$2a$	počet paralelních větví
N	počet všech aktivních závitů v kotvě
$V = 2N$	počet všech aktivních vodičů v kotvě
$N_s = \frac{N}{2a}$	počet závitů spojených do série v jedné větvi
n_c	počet cívek
$2n_c$	počet cívkových stran
Q	počet drážek
Q_p	počet drážek na pól
K	počet lamel komutátoru
u	počet lamel na jednu drážku (je roven počtu cívkových stran v jedné vrstvě drážky)
y_1	zadní krok stranový (udává počet cívkových stran mezi dvěma aktivními stranami téže cívky); určuje délku zadních cívkových čel, proto se nazývá zadní krok
y_2	přední krok stranový (udává počet cívkových stran mezi zadní stranou první a přední stranou druhé cívky); určuje délku předních cívkových spojek, proto se nazývá přední krok
y	výsledný krok stranový (udává počet stran mezi předními stranami dvou cívek spojených za sebou)
y_k	komutátorový krok (udává počet lamel mezi začátkem a koncem jedné cívky)

y_d výsledný krok drážkový
 y_{d1} zadní krok drážkový vyjádřený počtem drážkových roztečí
 y_{d2} přední krok drážkový

Význam kroků y , y_1 , y_2 a y_k je vyznačen na obr. 25.



Obr. 25. Základní druhy vinutí a význam kroků:
 a) vinutí smyčkové, b) vinutí vlnové



Obr. 26. Číslování cívkových stran, počítání cívkových a drážkových kroků

Cívkové strany číslujeme tak, že přední strany ležící v horní vrstvě, mají lichá čísla a zadní strany, uložené ve spodní vrstvě, mají čísla sudá (obr. 26).

U *jednovrstvového vinutí* je celkový počet cívek

$$n_c = \frac{Q}{2} \quad (73a)$$

a počet lamel komutátoru

$$K = n_c = \frac{Q}{2} \quad (73b)$$

neboť na každé lamele je připojen jeden začátek a jeden konec cívky.

U *dvouvrstvového vinutí* se dvěma cívkovými stranami v drážce ($u = 1$) je stejně jako u střídavých vinutí

$$n_c = Q \quad (74)$$

a počet lamel komutátoru

$$K = n_c = Q \quad (75)$$

Obecně je u *dvouvrstvového vinutí* v drážce $2u$ cívkových stran, takže počet cívek je

$$n_c = uQ \quad (76)$$

a počet lamel komutátoru

$$K = n_c = uQ \quad (77)$$

Výsledný stranový krok je podle obr. 25 dán součtem

$$y = y_1 + y_2 \quad (78)$$

Výpočet jednotlivých kroků v počtu cívkových stran je zřejmý z obrázku 26.

Na obr. 26a je příklad vlnového vinutí s jednou cívkovou stranou v jedné vrstvě ($u = 1$)

zadní stranový krok je $y_1 = 7$ stran,
 cívku tvoří strany 1–8,
 přední stranový krok je $y_2 = 5$ stran,
 výsledný stranový krok je podle (78)

$$y = y_1 + y_2 = 7 + 5 = 12 \text{ stran}$$

Na obr. 26b je příklad smyčkového vinutí pro $u = 2$ (čtyři strany v drážce) s kroky:

$y_1 = 17$ stran,

$y_2 = -15$ stran (přední stranový krok se počítá směrem zpět, proto má znaménko minus),

výsledný stranový krok

$$y = y_1 + y_2 = 17 - 15 = 2 \text{ strany}$$

proto dvě za sebou spojené cívky mají přední strany označeny čísly 1 a 3.

Z obr. 26 můžeme odvodit vztah mezi zadním krokem drážkovým y_{d1} a zadním stranovým krokem y_1 , uvedeným v počtu cívkových stran:

Jestliže se zadní stranový krok vyjádří počtem drážkových roztečí y_{d1} , potom tento krok uvedený v počtu cívkových stran je dán vztahem

$$y_1 = 2uy_{d1} + 1 \quad (79)$$

Podle obr. 26a je tedy pro $u = 1$

$$y_{d1} = 3 \text{ drážky}$$

$$y_1 = 2 \cdot 1 \cdot 3 + 1 = 7 \text{ stran (souhlasí)}$$

a podle obr. 26b je pro $u = 2$

$$y_{d1} = 4 \text{ drážky}$$

$$y_1 = 2 \cdot 2 \cdot 4 + 1 = 17 \text{ stran (souhlasí)}$$

2.1.2. Smyčkové (paralelní) vinutí

Podle postupu připojování cívek ke komutátoru může být toto vinutí nekřížené ($y_k = 1$; $y_2 < y_1$) nebo křížené ($y_k = -1$; $y_2 > y_1$).

V každém případě je počet paralelních větví, které uzavřené vinutí tvoří, roven počtu pólů

$$2a = 2p \quad (80)$$

Na obr. 27a je dvoupólové nekřížené smyčkové vinutí se dvěma stranami v drážce ($u = 1$), $Q = 12$ drážek, $K = 12$ lamel (jedna lamela na drážku), $Q_p = 12/2 = 6$ drážek.

Zvolený plný zadní drážkový krok

$$y_{d1} = 6 \text{ drážek}$$

kterému odpovídá zadní stranový krok

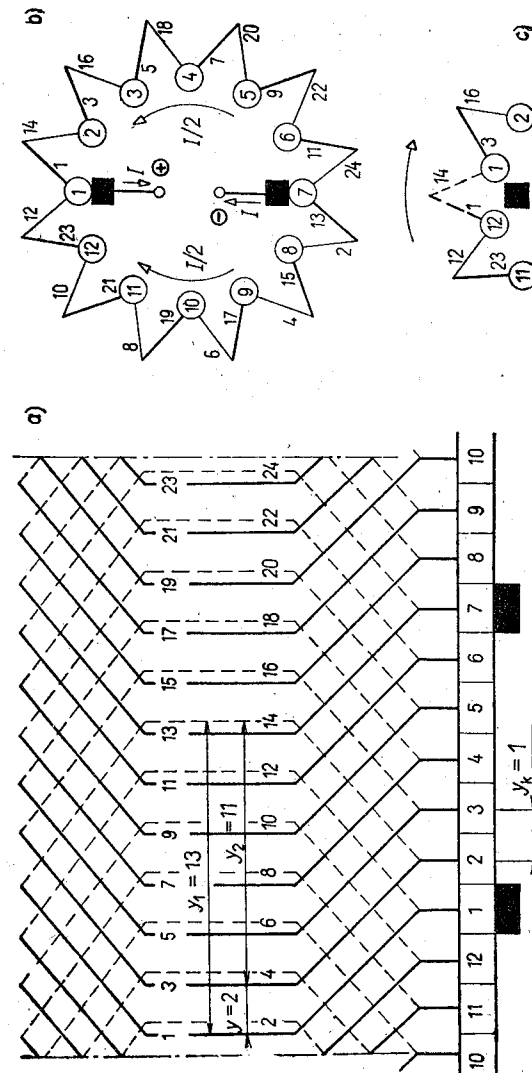
$$y_1 = 2uy_{d1} + 1 = 2 \cdot 1 \cdot 6 + 1 = 13 \text{ stran}$$

výsledný stranový krok smyčkového vinutí

$$y = 2 \text{ strany}$$

takže přední stranový krok je

$$y_2 = y - y_1 = 2 - 13 = -11 \text{ stran}$$



Obr. 27. Dvoupólové nekřížené smyčkové vinutí: $Q = 12$, $K = 12$, $y_{d1} = 6$, $y_1 = 13$, $y_2 = -11$, $y = 2$, $y_k = 1$, $u = 1$

Komutátorový krok nekříženého vinutí

$$y_k = 1 \text{ lamela}$$

První cívku tvoří strany 1 a 14 ($1 + 13 = 14$).

U dvoupólového stroje vycházejí jen dvě paralelní větve a dva kartáče. Rozdělení vinutí na paralelní větve můžeme sledovat na komutátorovém schématu, které je nakresleno na obr. 27b.

Lamely na komutátorovém schématu nakreslíme do kruhu v tom pořadí, jak se jimi postupně uzavírá vinutí. Mezi ně zakreslíme jednotlivé cívky, označené čísly svých stran. Kartáče se rozdělí rovnoměrně po obvodě.

Cívky mezi dvěma sousedními kartáči představují jednu paralelní větev. Nakreslen je okamžik, kdy každý kartáč leží jen na jedné lamelě, takže do série je zapojen největší možný počet cívek (6). Při pootočení o půl lamely (obr. 27c) je v každé větvi jedna cívka zkratovaná (komutuje) a v tom okamžiku se v ní neindukuje napětí.

Z komutátorového schématu je vidět, jak se proud rozděluje do jednotlivých paralelních větví. Při dvou větších prochází každou poloviční proud ($I/2$).

Kolisání indukovaného napětí můžeme sledovat na napětovém mnohoúhelníku (polygónu), obr. 28.

Jestliže se skutečný, obvykle lichoběžníkový, časový průběh indukovaného napětí podél pólové rozteče nahradí první harmonickou, můžeme indukované napětí jednotlivých cívkových stran nahradit fázory, které jsou proti sobě posunuty o drážkový úhel

$$\alpha_d = \frac{360^\circ}{Q} = \frac{p \cdot 360^\circ}{Q} \quad (81)$$

kde Q/p je počet drážek na jednu pólovou dvojici, tedy pro 360° el.

Fázory napětí všech stran v jedné drážce jsou ve fázi.

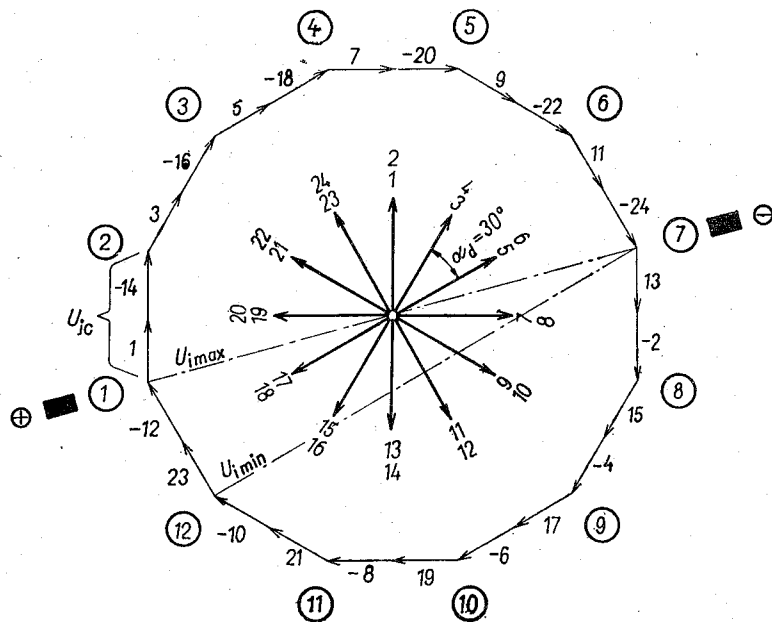
Napětový mnohoúhelník je dán součtem fázorů napětí všech stran v tom pořadí, jak jsou za sebou zapojeny.

Fázory napětí zadních stran cívky se musí od fázorů napětí předních stran odečítat, aby absolutní hodnota fázoru výsledného indukovaného napětí cívky odpovídala jeho skutečné hodnotě, která je dána aritmetickým součtem dvou opačně orientovaných napětí obou za sebou spojených cívkových stran.

Čísly v kroužku se ve vrcholech napětového mnohoúhelníku vyznačí lamely a na nich je možné s příslušnou pólovou roztečí vyznačit sběrací kartáče.

Postupným sčítáním fázorů indukovaných napětí všech cívkových stran vznikl pro dané vinutí (12 drážek na pólovou dvojici) dvanáctiúhelník. Řešením několika různých příkladů můžeme dokázat, že u dvouvrstvového vinutí se dvěma cívkovými stranami v drážce ($u = 1$) má napětový mnohoúhelník tolik vrcholů, kolik drážek připadá na jednu pólovou dvojici ($2Q_p$).

Fázory napětí cívkových stran mezi dvěma sousedními kartáči patří k jedné paralelní větvi. Průmět jejich součtu do osy procházející vrcholy s přiloženými kartáči (v příkladě lamely 1–7) představuje skutečnou velikost napětí indukovaného ve vinutí. V nakresleném případě je to velikost $U_{i \max}$, která odpovídá plnému počtu cívek spojených do série. Minimální napětí $U_{i \min}$ odpovídá geometrickému součtu při jedné vyřazené (komutující) cívce. Kolisání indukovaného napětí mezi krajními hodnotami bude tím menší, čím více se napětový mnohoúhelník blíží kružnici.



Obr. 28. Napětový mnohoúhelník vinutí z obr. 27

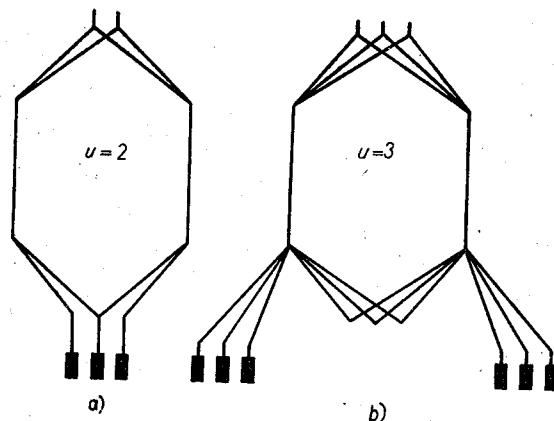
2.1.3. Smyčkové vinutí s větším počtem lamel na drážku

Jestliže se nedá udělat na stroji tolik drážek, kolik je potřebných cívek, nebo jestliže musíme zvětšit počet lamel komutátoru z důvodů snížení lamelového napětí (tzn. napětí mezi dvěma sousedními lamelami), potom se do jedné vrstvy v drážce navrhne několik stran různých cívek. Nejčastěji bývá v jedné vrstvě $u = (1 \text{ až } 5)$ cívkových stran.

Touto úpravou se zvětší počet lamel a cívek u -krát. Z toho pak plyne další podmínka pro smyčkové vinutí:

Počet lamel musí být dělitelný číslem p a také číslem u .

Technologicky se vinutí s několika lamelami na drážku zhotovuje tak, že u samostatně izolovaných cívek se společně formuje, popř. i společně navíjí na jedné šabloně, opatří se společnou izolací a jako jeden celek se vkládá do drážek. Tento společný izolovaný svazek má u začátků a u konců. U smyčkového vinutí můžeme spojit přímo konec první cívky se začátkem další cívky. Podle počtu cívek ve svazku vzniká dvojevíčka, trojevíčka apod. Na obr. 29 je tvar dvojevíčka smyčkového vinutí se společným spojením mezi první a druhou cívkou a tvar trojevíčka vlnového vinutí.



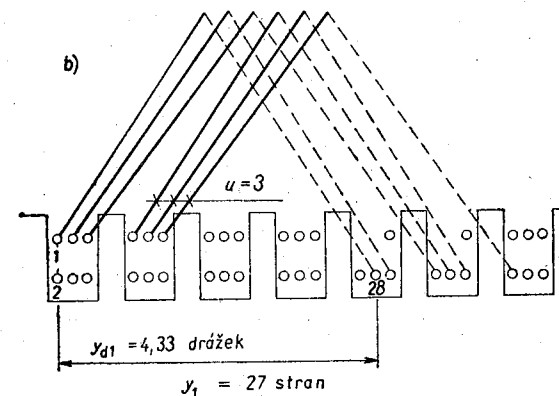
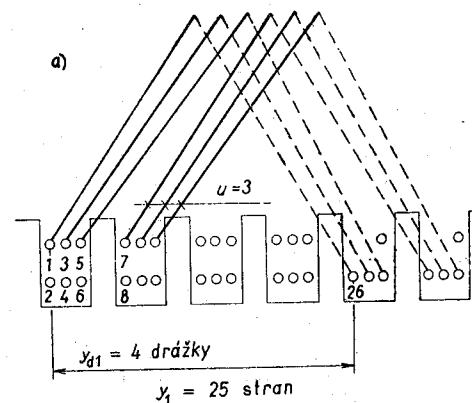
Obr. 29. Tvary cívek při několika lamelách na drážku:

- a) dvojevíčka smyčkového vinutí,
- b) trojevíčka vlnového vinutí

Jestliže mají být všechny cívky jednoho svazku stejné, musí být zadní drážkový krok y_{d1} dán celým číslem. Potom u cívek vychází z jedné drážky a společně vcházejí do další drážky. Takové vinutí se nazývá *nepřestupné* (obr. 30a).

Jestliže je zadní drážkový krok y_{d1} dán necelým číslem, vznikne vinutí *přestupné* (obr. 30b). Cívky, které společně vycházejí z jedné drážky, se rozdělí svými zadními stranami do dvou sousedních drážek. Nevýhodou pře-

stupného vinutí je, že cívky nejsou stejné, hůře se navíjejí, ale přece se tohoto vinutí používá, neboť dobře komutuje a jeho napětí méně pulzuje než napětí vinutí nepřestupného.



Obr. 30. Nepřestupné a přestupné vinutí:

- a) nepřestupné,
- b) přestupné

Jestliže v jedné drážkové vrstvě je u cívkových stran vedle sebe, musí být drážkový krok přestupných vinutí vyjádřený zlomkem, v jehož jmenovateli je číslo u .

Příklad 5

Máme navrhnout smyčkové vinutí pro čtyřpólový stroj, přičemž je možné umístit na jednu pólovou rozteč asi 4 drážky a na jednu drážku přijdou 2 lamely.

Počet drážek

$$Q = 2pQ_p = 4 \cdot 4 = 16$$

a počet lamel

$$K = uQ = 2 \cdot 16 = 32$$

Vinutí je možné navrhnout, neboť K je dělitelné počtem pólových dvojic (2). V opačném případě bychom museli změnit počet drážek.

Počet všech cívkových stran

$$2n_c = 2uQ \quad (82)$$

$$2n_c = 2 \cdot 2 \cdot 16 = 64$$

Zadní drážkový krok volíme stejný jako je pólová rozteč, tedy

$$y_{a1} = Q_p = 4 \text{ drážky}$$

takže vinutí bude nepřestupné.

Výsledný stranový krok smyčkového vinutí je $y = 2$ strany.

Dílní kroky budou:

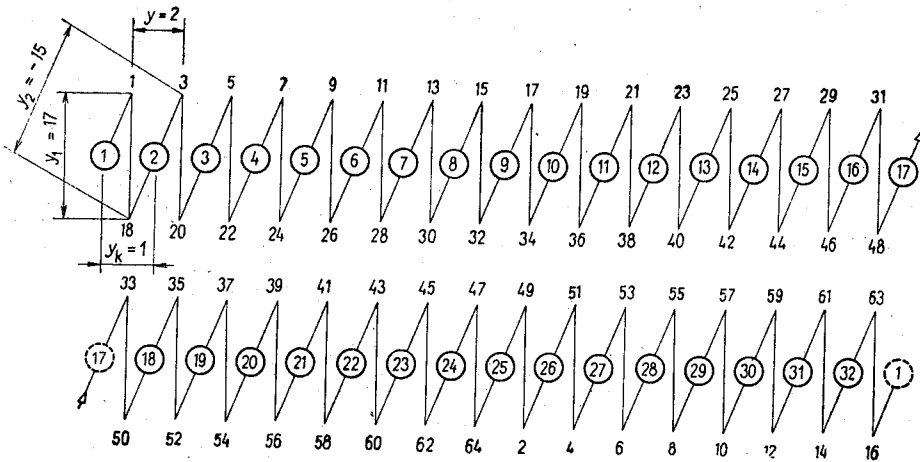
zadní stranový krok, podle (79)

$$y_1 = 2uy_{a1} + 1 = 2 \cdot 2 \cdot 4 + 1 = 17 \text{ stran}$$

a přední stranový krok, podle (78)

$$y_2 = y - y_1 = 2 - 17 = -15 \text{ stran}$$

Z těchto údajů můžeme nakreslit náhradní schéma (obr. 31). Volíme nekřížené vinutí s komutátorovým krokem $y_k = 1$.



Obr. 31. Náhradní schéma nepřestupného smyčkového vinutí:

$$Q = 16, Q_p = 4, K = 32, 2p = 4, u = 2, y = 2, y_1 = 17, y_2 = -15, y_{a1} = 4$$

První lamela se spojí s první cívkovou stranou. Zadní strana cívky bude mít číslo $(1 + y_1) = 18$ a připojí se na lamelu číslo 2. Přední stranový krok je -15 stran, takže přední strana další cívky bude mít číslo $18 - 15 = 3$ nebo počítáno z výsledného stranového kroku $(1 + 2) = 3$. Její zadní strana bude $(3 + 17) = 20$, atd.

Kdybychom chtěli navrhnout vinutí přestupné, musel by být zadní drážkový krok $y_{a1} = 3,5$ nebo 4,5. Výhodnější je volit zkrácený krok (kratší čela, méně mědi), tedy $y_{a1} = 3,5$ drážek ($3\frac{1}{2}$ - ve jmenovateli $u = 2$), kterému odpovídají kroky:

zadní stranový krok

$$y_1 = 2 \cdot 2 \cdot 3,5 + 1 = 15 \text{ stran}$$

přední stranový krok

$$y_2 = 2 - 15 = -13 \text{ stran}$$

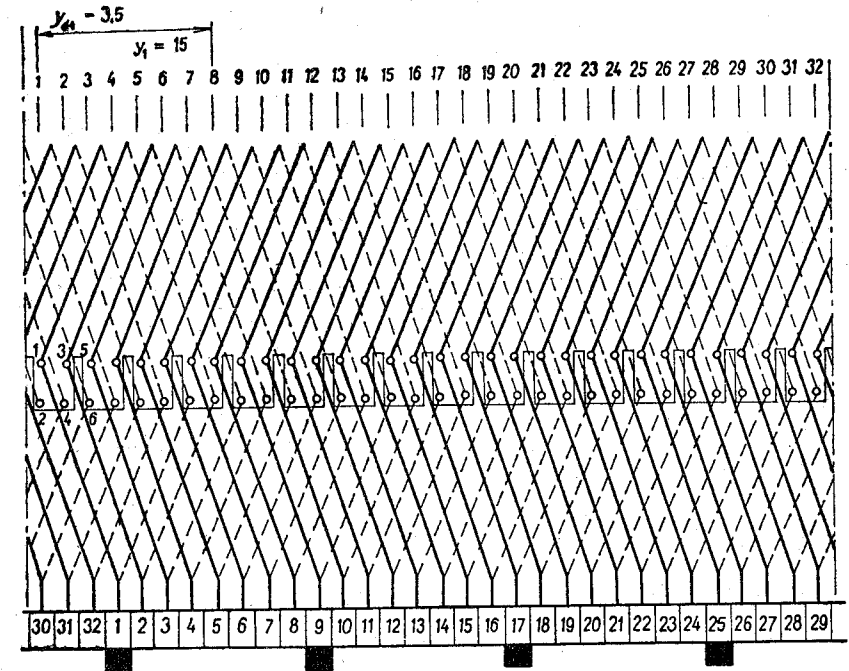
výsledný stranový krok je stejný

$$y = 2 \text{ strany}$$

komutátorový krok pro nekřížené vinutí

$$y_k = 1 \text{ lamela}$$

Rozvinuté schéma tohoto přestupného vinutí je na obr. 32.



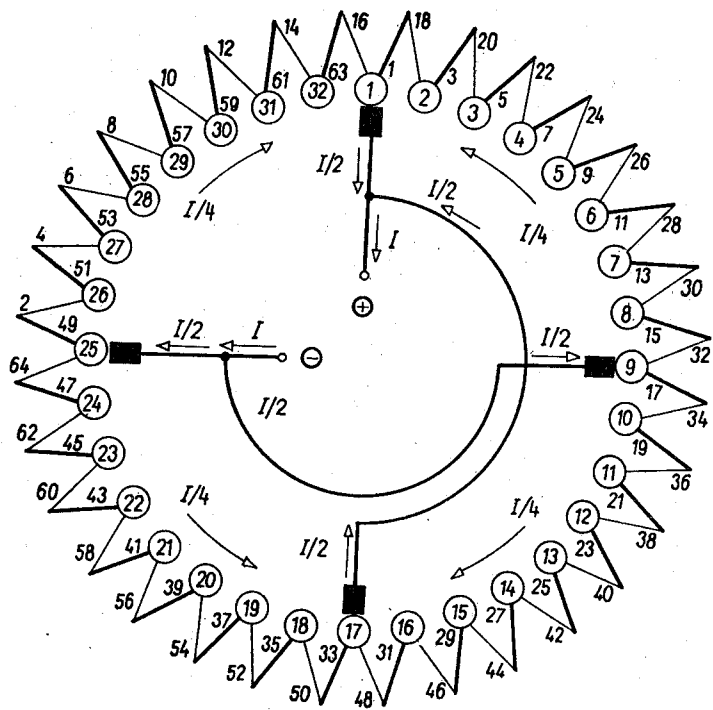
Obr. 32. Vinutí z obr. 31 zhotovené jako přestupné
 $y_{a1} = 3,5; y_1 = 15; y_2 = -13, y = 2, y_k = 1$

Má-li stroj čtyři póly, musí mít vinutí čtyři kartáče, které rovnoměrně rozdělíme po obvodu komutátoru.

Komutátorové schéma je na obr. 33 a polygon napětí na obr. 34.

Drážkový úhel je

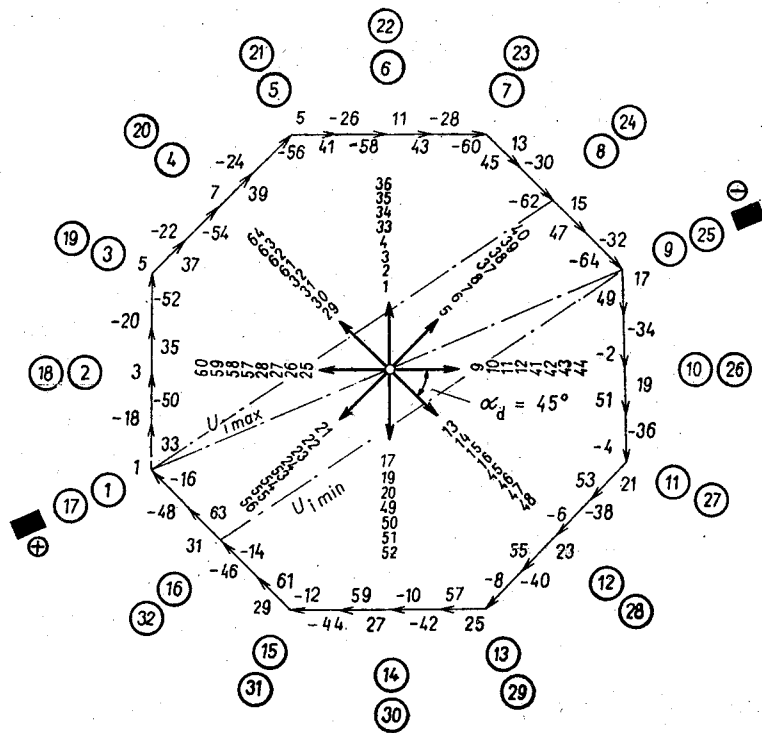
$$\alpha_d = \frac{2 \cdot 360^\circ}{15} = 48^\circ$$



Obr. 33. Schéma zapojení smyčkového vinutí z obr. 31 na komutátor

Fázorová hvězda má osm paprsků, a protože na každou pólovou dvojici připadá stejný počet drážek, paprsky druhé pólové dvojice se kryjí s paprsky první pólové dvojice. Stejně tak se kryjí i napětové mnohoúhelníky obou dvojic.

Hladšího průběhu indukovaného napětí lze dosáhnout přestupným vinutím. Napětový mnohoúhelník přestupného vinutí má dvojnásobný počet vrcholů.



Obr. 34. Napětový mnohoúhelník pro nepřestupné vinutí z obr. 31

2.1.4. Vyrovnávací spojky

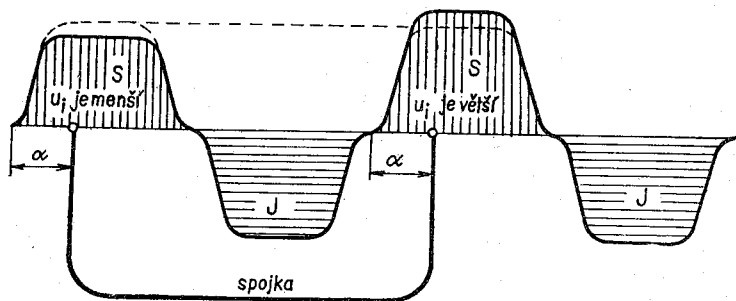
U smyčkového vinutí bývá na stroji (zejména mnohopólovém) větší počet paralelních větví. Z konstrukčních i komutátorových schémat je vidět, že cívky jedné větve jsou vždy rozloženy jen pod dvěma sousedními póly.

Pro správný chod stroje je nutné, aby se v každé paralelní větvi indukovalo stejné napětí a odpory všech větví vyrovnávací proudy, které se uzavírají kartáči a jejich spojkami. Ty jsou jimi zbytečně zatěžovány a průchodem vyrovnávacího proudu vznikají zbytečné ztráty. Při poměrně malém odporu cívek vznikají i při nepatrném rozdílu indukovaných napětí velké vyrovnávací proudy.

U smyčkového vinutí se mohou nestejná napětí indukovat vlivem nestejných magnetických toků jednotlivých pólových dvojic. Jestliže cívky

jedné větve nejsou rozloženy pod všemi póly, nemůže se magnetická nesouměrnost pólových dvojic vyrovnat, jako je tomu např. u vlnového vinutí.

Aby i při magnetické nebo elektrické nesouměrnosti neprocházel kartáč a jejich spojkami vyrovnávací proud, dělají se u smyčkového vinutí vyrovnávací spojky. Spojují na kotvě ty vodiče, které by při absolutní souměrnosti měly stejný potenciál (obr. 35). Případné vyrovnávací proudy se uzavírají jen jimi a nezatěžují kartáče a jejich spojky. Současně zaručují



Obr. 35. Vyrovnávací spojka (spojuje vodiče, jež by měly mít stejný potenciál)

rovnoměrné rozložení napětí na komutátoru a tím přispívají i k lepší komutaci.

Vyrovnávací spojky děláme zejména u velkých strojů, které pracují za obtížných provozních podmínek, např. válcovací, trakční, těžní motory a galvanizační dynama.

Aby se vyrovnávací spojky vinutí daly zhotovit, musí být vinutí navrženo tak, aby lamely komutátoru jednotlivých větví měly stejný potenciál. Proto musí být počet lamel dělitelný počtem pólových dvojic.

Podle uspořádání jsou:

a) *spočky první třídy* — spojují ekvipotenciální lamely na komutátoru nebo ekvipotenciální body na zadních čelech cívek,

b) *spočky druhé třídy* — spojují lamely s ekvipotenciálními body na zadních čelech cívek, používají se jen u sériově paralelních a několikanásobně paralelních vinutí.

U menších strojů se z úsporných důvodů nedělají všechny možné vyrovnávací spojky, ale pouze jejich část, např. 25, 33 nebo 50 %. Velké stroje musí mít plný počet vyrovnávacích spojek.

Aby vyrovnávací spojka skutečně spojovala místa stejného potenciálu, tzn. místa ležící ve stejném magnetickém poli, musí být krok vyrovnávacích spojek

$$y_p = \frac{K}{p} \quad (83)$$

Které lamely, nebo která čela cívek můžeme spojkami spojit, lze zjistit z napětového mnohoúhelníku.

Ekvipotenciální lamely můžeme vysledovat i z náhradního schématu, jestliže se lamely jednotlivých pólových dvojic nakreslí pod sebe.

U menších strojů můžeme vyrovnávací spojky zhotovit jako vodivé kruhy uložené na zadní straně kotvy, ke kterým se připojují ekvipotenciální body vinutí.

2.1.5. Vlnové (sériové) vinutí

Jak bylo odvozeno v prvním dílu učebnice, můžeme vlnové vinutí navrhnout jen při určitém počtu lamel, pro který platí

$$K = py_k \pm 1 \quad (84)$$

přičemž zadní drážkový krok y_{d1} je jako vždy přibližně roven pólové rozteči ($Q/2p$), komutátorový krok y_k je dvojnásobný ($y_k = 2y_{d1}$) a zadní stranový krok je podobně jako u smyčkového vinutí dán vztahem

$$y_1 = 2uy_{d1} + 1 \quad (85)$$

Výsledný stranový krok je u vlnového vinutí roven dvěma pólovým roztečím, tedy

$$y = 2y_k$$

U vlnového vinutí vycházejí při jakémkoli počtu pólů jen dvě paralelní větve ($2a = 2$).

Příklad 6

Navrhněte vlnové vinutí pro šestipólový stroj s počtem drážek na pól $Q_p = 3$ a $u = 1$.

Předběžné údaje

$$Q = 2pQ_p = 6 \cdot 3 = 18$$

a pro $u = 1$

$$K = Q = 18$$

Tento počet lamel je třeba upravit tak, aby vyhovoval rovnici (84)

$$K = py_k \pm 1$$

zadní drážkový krok je

$$y_{d1} = \frac{Q}{2p} = \frac{18}{6} = 3 \text{ drážky}$$

a jemu odpovídá komutátorový krok

$$y_k = 2y_{a1} = 2 \cdot 3 = 6 \text{ lamel}$$

takže počet lamel může být

$$K = 3 \cdot 6 \pm 1 = \begin{cases} 19 & \text{nekřížené vinutí} \\ 17 & \text{křížené vinutí} \end{cases}$$

Pro nekřížené vinutí vychází

$$Q = K = 19$$

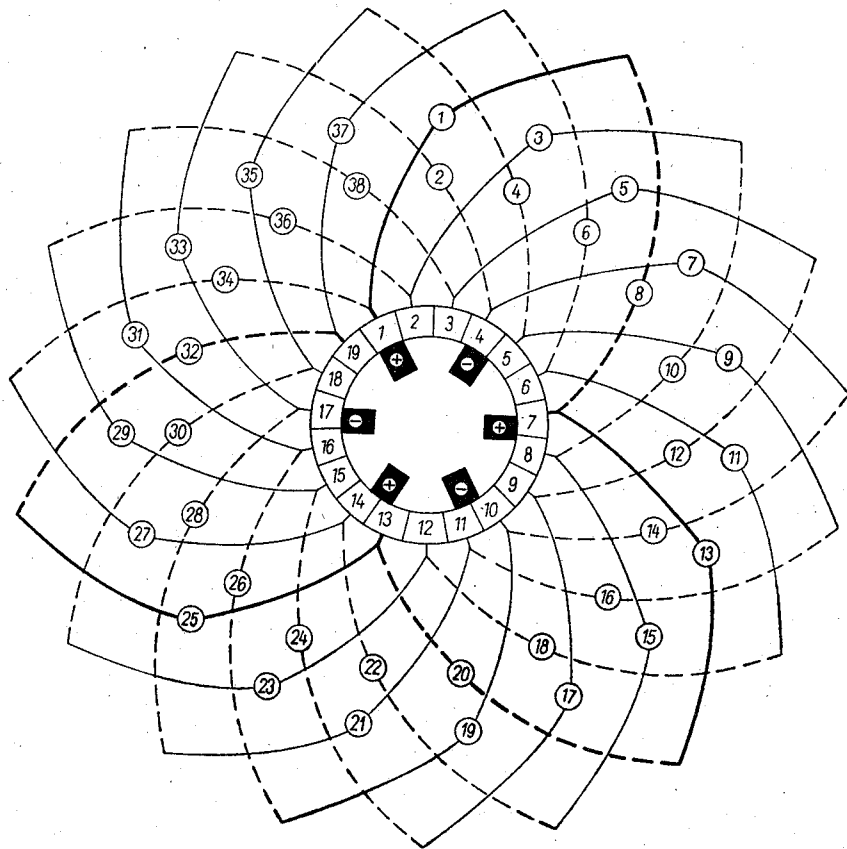
$$y_{a1} = 3 \text{ drážky}$$

$$y_1 = 2uy_{a1} + 1 = 2 \cdot 1 \cdot 3 + 1 = 7 \text{ stran}$$

$$y_k = 6 \text{ lamel}$$

$$y = 2y_k = 2 \cdot 6 = 12 \text{ stran}$$

$$y_2 = y - y_1 = 12 - 7 = 5 \text{ stran}$$



Obr. 36. Vlnové nekřížené vinutí:

$$Q = K = 19, y_{a1} = 3, y_1 = 7, y = 12, y_2 = 5, y_k = 6, u = 1, 2p = 6, 2a = 2$$

Vinutí je nakresleno na obr. 36.

Jestliže ve schématu dáme první kartáč (široký jako lamela) na lamelu 1, jsou ostatní kartáče rovnoměrně rozděleny po obvodu komutátoru s roztečí odpovídající jedné šestině obvodu.

2.1.6. Vlnové vinutí s několika lamelami na drážku

I u vlnového vinutí je možné vložit do jedné drážky několik oívkových stran. Počet lamel potom musí vyhovovat nejen vztahu (84), ale současně musí být dělitelný číslem u

$$K = uQ$$

$$K = py_k \pm 1 \quad (87)$$

tedy musí platit

$$y_k = \frac{uQ \pm 1}{p} \quad (88)$$

Z tohoto vztahu je vidět, že má-li být komutátorový krok y_k dělitelný celým číslem, nesmí být čísla u a p navzájem dělitelná.

Proto jsou u vlnového vinutí možné pouze tyto počty lamel na drážku:

pro	$2p = 2$	$u = 1$
	$2p = 4$	$u = 1, 3, 5$
	$2p = 6$	$u = 1, 2, 4$
		atd.

Komutátorový krok je přitom

$$y_k = 2uy_{a1} \quad (89)$$

Vinutí může být opět nepřestupné, jestliže y_{a1} je dáno celým číslem, nebo přestupné, jestliže y_{a1} je zlomkové.

Příklad 7

Navrhněte vlnové vinutí pro čtyřpólový stroj, který může mít asi pět drážek na pól a tři lamely na drážku.

Počet drážek by mohl být

$$Q = 2pQ_p = 4 \cdot 5 = 20$$

a počet lamel

$$K = uQ = 3 \cdot 20 = 60$$

zadní drážkový krok by mohl být

$$y_{a1} = \frac{Q}{2p} = \frac{20}{4} = 5 \text{ drážek}$$

a příslušný komutátorový krok

$$y_k = 2uy_{a1} = 2 \cdot 3 \cdot 5 = 30 \text{ lamel}$$

Tento krok je třeba upravit tak, aby byl při tomto kroku počet lamel dělitelný třemi a současně vyhovoval vztahu (84)

$$K = py_k \pm 1$$

pro $y_k = 30$ může být

$$K = 2 \cdot 30 \pm 1 = \begin{cases} 61 \\ 59 \end{cases}$$

ani jeden počet lamel nevyhovuje, neboť není dělitelný třemi. Zkusíme proto $y_k = 29$

$$K = 2 \cdot 29 \pm 1 = \begin{cases} 59 & \text{nevyhovuje} \\ 57 & \text{vyhovuje, je dělitelné třemi,} \\ & \text{ale dává křížené vinutí} \end{cases}$$

Volíme $y_k = 31$

$$K = 2 \cdot 31 \pm 1 = \begin{cases} 63 & \text{vyhovuje} \\ 61 & \text{nevyhovuje} \end{cases}$$

Volíme tedy

$$K = 63 \quad (\text{neokřížené vinutí})$$

$$Q = \frac{K}{u} = \frac{63}{3} = 21 \text{ drážek}$$

$$y_k = 31 \text{ lamel}$$

Celkový výsledný stranový krok bude

$$y = 2y_k = 2 \cdot 31 = 62 \text{ stran}$$

Tento krok se musí rozdělit na přibližně stejné kroky y_1 a y_2 : U nepřestupného vinutí musí být y_{d1} celé číslo, ponecháme

$$y_{d1} = 5 \text{ drážek}$$

a tomu odpovídá zadní stranový krok

$$y_1 = 2uy_{d1} + 1 = 2 \cdot 3 \cdot 5 + 1 = 31 \text{ stran}$$

a potom přední stranový krok

$$y_2 = y - y_1 = 62 - 31 = 31 \text{ stran}$$

Schéma nepřestupného vinutí je na obr. 37.

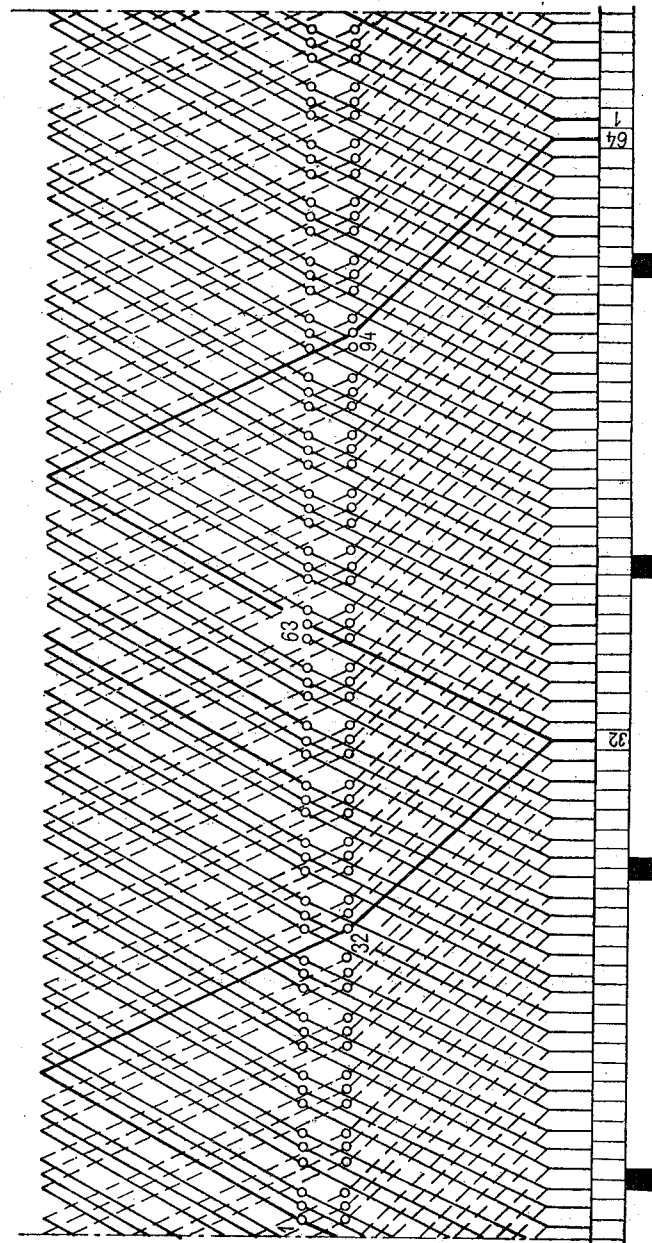
U přestupného vinutí je krok y_{d1} zlomkový a ve jmenovateli musí mít číslo $u = 3$.
Může být např.:

$$y_{d1} = 4\frac{2}{3} \quad \text{nebo} \quad 4\frac{1}{3} \quad \text{nebo} \quad 5\frac{1}{3}$$

Při hodnotě $4\frac{2}{3}$ vychází

$$y_1 = 2 \cdot 3 \cdot 4\frac{2}{3} + 1 = 29 \text{ stran}$$

$$y_2 = 62 - 29 = 33 \text{ stran}$$



Obr. 37. Nepřestupné čtyřpólové vinové vinutí: $Q = 21$, $K = 63$, $u = 3$,
 $y_k = 31$, $y_1 = 31$, $y_2 = 31$, $y_{d1} = 5$

2.1.7. Sériověparalelní vinutí

Používá se u mnohopólových strojů tehdy, jestliže by u vlnového vinutí dvě paralelní větve nestačily (vodiče o velkém průřezu) a u smyčkového vinutí by zase $2p$ paralelních větví bylo mnoho, s málo závitů spojenými do série. Je to tedy vinutí, pro které platí

$$2 < 2a < 2p \quad (90)$$

Sériověparalelní vinutí vznikne z vlnového vinutí tak, že konec skupiny p cívek přijde o a lamel před nebo za lamelu, na kterou je připojen začátek skupiny. Potom počet lamel musí být

$$K = py_k \pm a \quad (91)$$

kde a je počet požadovaných dvojic paralelních větví.

Aby se vinutí dalo zhotovit, musí být počet pólových dvojic p dělitelný číslem a .

Z toho plyne, že sériověparalelní vinutí můžeme používat jen pro osmi a vícepólové stroje. Pro menší počty pólů není možné, aby platil vztah (90) i podmínka dělitelnosti.

Jsou možné tři případy:

- Komutátorový krok y_k není dělitelný číslem a , potom se vinutí uzavře do jednoho kruhu, který $2p$ kartáčů rozdělí do $2a$ paralelních větví.
- Komutátorový krok y_k je dělitelný číslem a , potom se vinutí uzavře do a samostatných kruhů, které se navzájem spojí a rozdělí na paralelní větve jen přiložením kartáčů širokých a lamel.
- Jestliže a i y_k mají společného dělitele n , uzavře se vinutí do n kruhů a kartáče musí být široké n lamel.

Příklad 8

Navrhněte sériověparalelní vinutí pro $2p = 8$, $2a = 4$, $u = 1$, jestliže $Q_p = 4$. Vinutí můžeme zhotovit jako sériověparalelní, neboť číslo $p = 4$ je dělitelné číslem $a = 2$.

Předběžně volíme

$$y_{a1} = Q_p = 4 \text{ drážky}$$

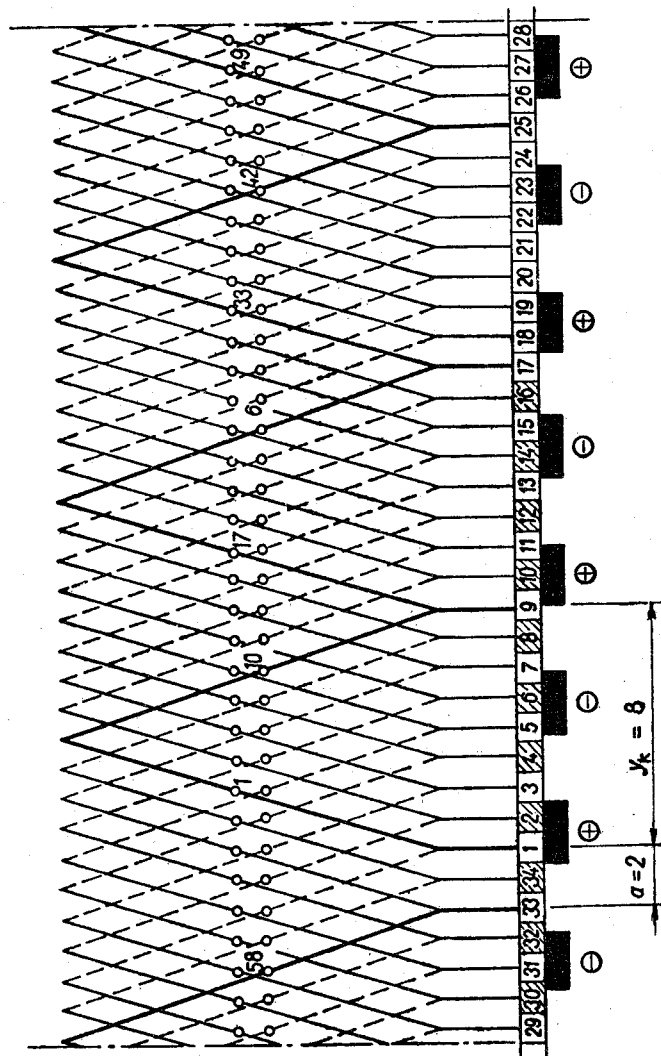
$$y_k = 2uy_{a1} = 2 \cdot 1 \cdot 4 = 8 \text{ lamel}$$

Tomu odpovídá celkový počet lamel na komutátoru

$$K = py_k \pm a = 4 \cdot 8 \pm 2 = \begin{cases} 34 \\ 30 \end{cases}$$

Volíme nekřížené vinutí

$$K = 34$$



Obr. 33. Sériově paralelní vinutí nekřížené: $Q = K = 34$, $y_k = 8$, $y = 16$, $y_1 = 9$, $y_2 = 7$, $u = 1$, $2a = 4$, $2p = 8$

$$Q = \frac{K}{u} = \frac{34}{1} = 34$$

$y_k = 8$ lamel

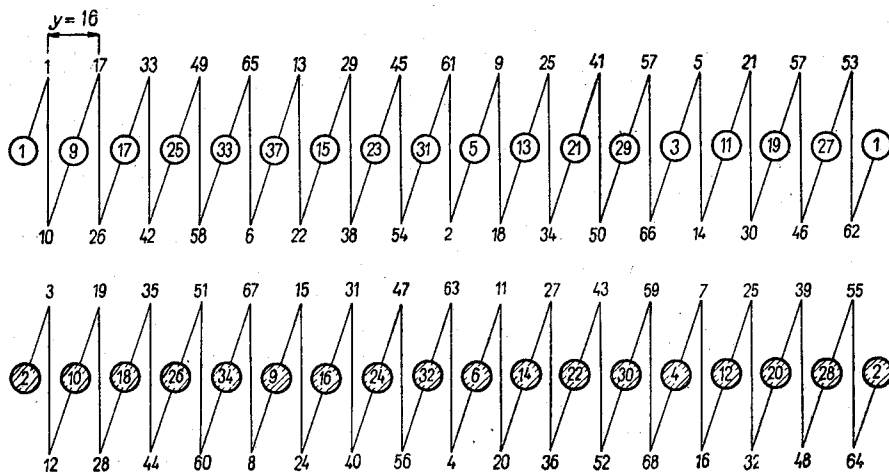
$y = 2y_k = 2 \cdot 8 = 16$ stran

$y_1 = 2uy_{d1} + 1 = 2 \cdot 1 \cdot 4 + 1 = 9$ stran

$y_2 = y - y_1 = 16 - 9 = 7$ stran

Komutátorový krok 8 je dělitelný počtem dvojice paralelních větví (2), takže vzniknou dva samostatné kruhy a kartáče musí být široké alespoň přes dvě lamely (obr. 38).

Rozpad vlnutí na dva kruhy je vidět i v náhradním schématu na obr. 39. Jestliže začíná vlnutí na lameli 1, potom po obejití všech lichých lamel se první kruh na této lameli i uzavře. Druhý kruh, který začíná např. na sousední lameli 2, po obejití všech sudých lamel se zase na této lameli uzavře.



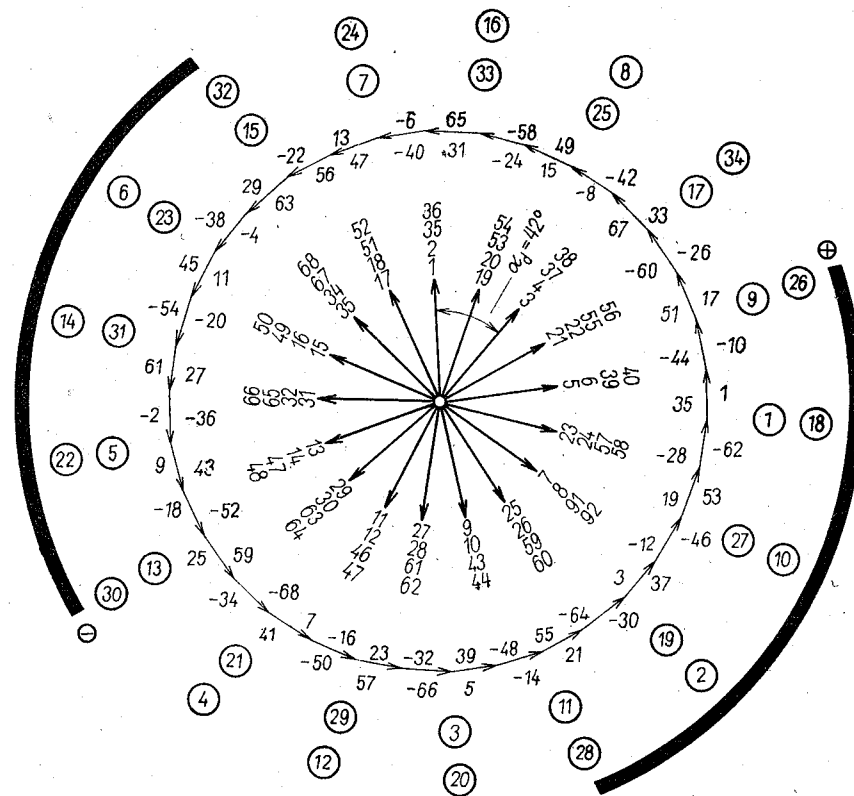
Obr. 39. Náhradní schéma vlnutí z obr. 38

Drážkový úhel vychází

$$\alpha_a = \frac{p \cdot 360^\circ}{Q} = \frac{4 \cdot 360^\circ}{34} = \frac{360^\circ}{8,5} = 42,35^\circ$$

Ve fázorové hvězdě připadá na jeden kruh 8,5 paprsku, takže paprsky druhé pólóvé dvojice přijdou mezi paprsky první dvojice. Fázory dalších dvou dvojic se s prvními kryjí (obr. 40). Napětový mnohoúhelník dvou pólóvých dvojic je 17úhelník a kryje se s mnohoúhelníkem dalších dvou dvojic. To je právě podmínka vzniku několika dvojic paralelních větví u vlnového vlnutí, zaručená dělitelností čísel p , α .

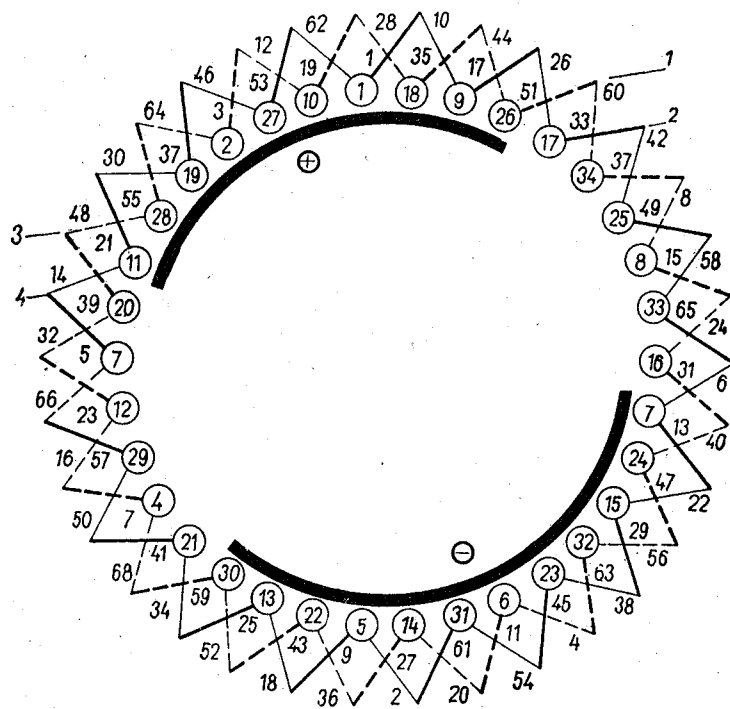
Z napětového mnohoúhelníku je vidět, že stejný potenciál mají např. lamely 1 a 18, a proto tyto dvě lamely musí v komutátorovém schématu (obr. 41) ležet vedle sebe.



Obr. 40. Napětový mnohoúhelník sériově paralelního vlnutí z obr. 38:
 $2p = 8$, $2a = 4$ (dva kruhy)

Které lamely v komutátorovém schématu budou spojeny kartáči, vyplývá z konstrukčního schématu vlnutí, ve kterém se $2p$ kartáčů rovnoměrně rozloží po obvodě komutátoru.

Z komutátorového schématu je také vidět, že v každé větvi jsou do série zapojeny čtyři cívky, dvě z prvního a dvě z druhého kruhu. Pro skutečný stroj by to bylo málo, uvedená parametry jsme zvolili malé, jen pro názornost a přehlednost vlnutí.



Obr. 41. Připojení vinutí z obr. 38 ke komutátoru

2.1.8. Několikanásobné paralelní vinutí

Je to smyčkové vinutí, které má více paralelních větví než pólů

$$2a = k2p \quad (92)$$

Je vhodné pro stroje na malá napětí, ale velmi značné proudy, u kterých by $2p$ paralelních větví vzhledem k proudu a jemu odpovídajícím průřezům nestačilo.

Zhotovuje se tak, že konec jedné cívky se nepřipojí na sousední lamelu, ale o k lamel doprava nebo doleva, takže platí

$$y_k = \pm k \quad (93)$$

$$y = 2k \quad (94)$$

Číslo k udává, kolikanásobné paralelní vinutí vznikne. Obvykle se používá dvojnásobné paralelní vinutí, tedy $k = 2$.

Jsou možné dva případy:

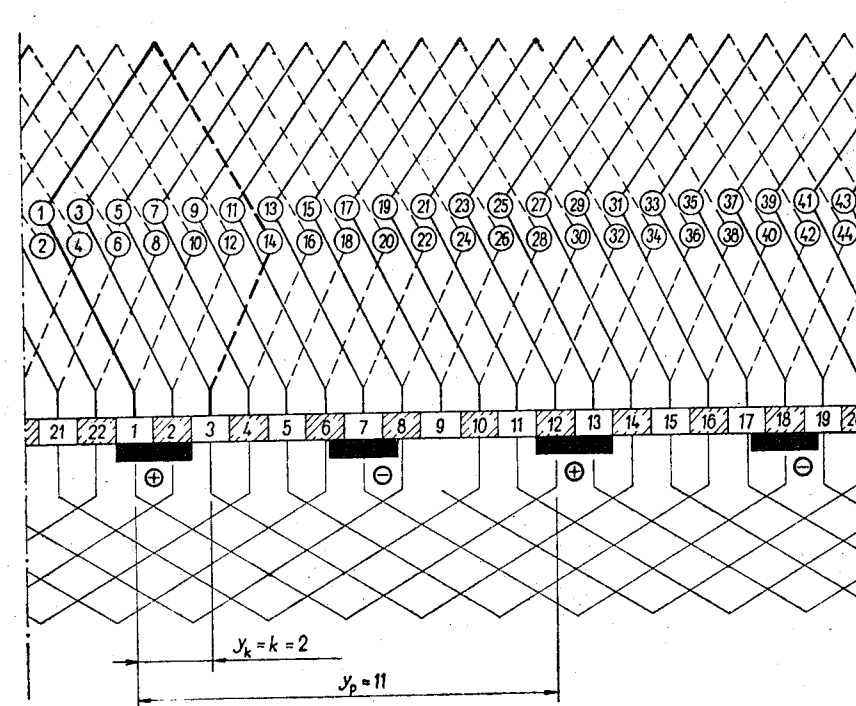
a) Je-li počet lamel K dělitelný číslem k , rozpadne se vinutí na k samostatných kruhů, které se musí kartáči nebo vyrovnávacími spojkami spojit, aby vzniklo $k2p$ paralelních větví. Kartáč musí být široký přes k lamel.

b) Nemí-li počet lamel K dělitelný číslem k , bude jen jeden uzavřený kruh.

Aby kartáče nebyly zatěžovány vyrovnávacími proudy, musí mít i několikanásobné paralelní vinutí vyrovnávací spojky.

Aby se daly vyrovnávací spojky zhotovit a aby několikanásobné paralelní vinutí mohlo pracovat, musí napětové mnohoúhelníky k skupin paralelních větví splýnout.

Na obr. 42 je dvojnásobné paralelní vinutí se dvěma cívkovými stranami v drážce, které má $Q = K = 22$, $2p = 4$, $k = 2$, $2a = 2 \cdot 4 = 8$ větví.



Obr. 42. Dvojnásobné paralelní vinutí s vyrovnávacími spojkami první třídy:
 $Q = K = 22$, $y_{a1} = 6$, $y_1 = 13$, $y_2 = -9$, $y = 4$, $y_k = 2$, $y_p = 11$, $2p = 4$,
 $k = 2$, $2a = 8$

Na jednu pólovou dvojici připadá lichý počet drážek

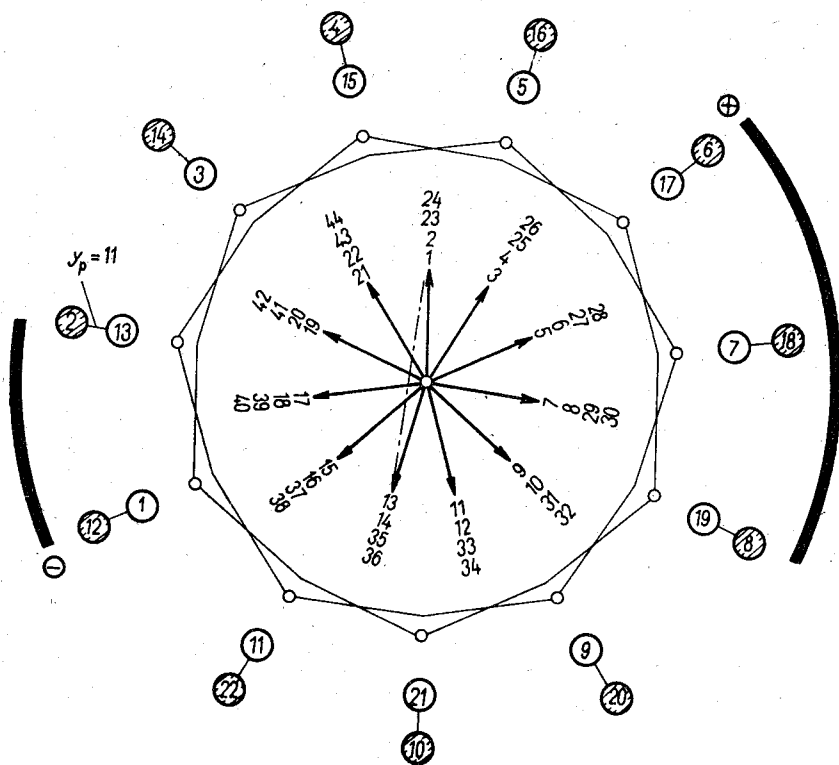
$$\frac{Q}{p} = \frac{22}{2} = 11$$

Na jeden pól připadá

$$Q_p = \frac{22}{4} = 5,5 \text{ drážek}$$

příslušný zadní drážkový krok musí být celé číslo, zvolené

$$y_{d1} = 6 \text{ drážek}$$



Obr. 43. Napěťový mnohoúhelník dvojparalelního vnutí z obr. 42

Jednotlivé kroky jsou

$$y_k = k = 2$$

$$y = 2y_k = 4$$

$$y_1 = 2uy_{d1} + 1 = 2 \cdot 1 \cdot 6 + 1 = 13$$

$$y_2 = y - y_1 = 4 - 13 = -9$$

Počet lamel 22 je opět dělitelný číslem $k = 2$, vnutí je uzavřené do dvou kruhů, v každém je polovina všech cívkových stran.

Napěťový mnohoúhelník (obr. 43) jednoho kruhu, např. od lamely 1 přes všechny liché lamely až po lamelu 1, vytváří nepravidelný mnohoúhelník, který ale splývá s mnohoúhelníkem druhého kruhu, uzavřeného přes všechny sudé lamely. Oba nepravidelné mnohoúhelníky splývají tak, že jejich vrcholy, ve kterých vycházejí lamely, mají pro oba kruhy ekvipotenciální polohu.

Krok vyrovnávacích spojek je

$$y_p = \frac{K}{p} = \frac{22}{2} = 11$$

tedy lichý.

Z mnohoúhelníku je vidět, že oba kruhy je možné spojit spojkami první třídy, kterými se spojí lamely patřící jednomu kruhu s lamelami druhého kruhu. Krok vyrovnávací spojky je $y_p = 11$, např. lamela 1 je spojkou spojena s lamelou 12. Lamely, které můžeme spojkami pospojovat, leží ve společných vrcholech mnohoúhelníka. Spojky jsou vyznačeny na obr. 42.

2.1.9. Kontrolní otázky

1. Jaké kroky musíme rozlišovat u stejnosměrných vnutí a v čem se udávají?
2. Jaký je vztah mezi počtem drážek a počtem lamel u jednovrstvových vnutí?
3. Jaký je základní vztah mezi zadním drážkovým krokem a zadním stranovým krokem?
4. Co udává veličina u , a proč se dělají vnutí s větší hodnotou u ?
5. Jaké jsou základní vlastnosti smyčkového vnutí?
6. Jak se sestrojí komutátorové schéma?
7. Jak se sestrojí napěťový mnohoúhelník?
8. Jaký je rozdíl mezi přestupným a nepřestupným vnutím?
9. Navrhněte základní parametry smyčkového vnutí pro $2p = 6$, $Q_p = 6$, $u = 3$. Parametry určete pro křížené i nekřížené vnutí.
10. Jaký význam mají vyrovnávací spojky?

11. Jaké jsou vlastnosti vlnového vinutí?
12. Jaké podmínky musí vyhovovat počet lamel vlnového vinutí?
13. Čemu je roven komutátorový krok vlnového vinutí, kdy vznikne přestupné a kdy nepřestupné vinutí?
14. Jakou podmínkou je vázán počet lamel na drážku a počet pólových dvojic u vlnového vinutí?
15. Jak vznikne náhradní schéma stejnosměrného vinutí?
16. Navrhněte základní parametry vlnového vinutí pro $2p = 6$, $Q_p = 7$, $u = 4$. Uvažujte nepřestupné nekřížené vinutí.
17. Kdy vznikne sériověparalelní vinutí a jaké jsou jeho vlastnosti?
18. Jaká je podmínka pro zhotovení sériově paralelního vinutí?
19. Navrhněte základní parametry sériově paralelního vinutí pro $2p = 12$, $2a = 6$, $u = 2$, $Q_p = 4$.
20. Kdy vznikne několikanásobně paralelní vinutí? Jaké jsou jeho vlastnosti?
21. Jaké jsou podmínky pro zhotovení několikanásobně paralelního vinutí?

2.2. STŘÍDAVÁ VINUTÍ

2.2.1. Základní pojmy

Druhy a vlastnosti jednotlivých typů střídavých vinutí byly popsány v prvním díle této učebnice. Bylo použito toto označení jednotlivých veličin:

- m počet fází
- p počet pólových dvojic
- Q celkový počet drážek
- Q_p počet drážek na jeden pól
- q počet drážek na pól a fázi
- n_c počet cívek
- t_p pólová rozteč
- y_a drážkový krok vinutí

Celkový počet drážek na stroji je

$$Q = q2pm \quad (95)$$

a plný drážkový krok vyjádřený počtem drážkových roztečí

$$y_a = t_p = \frac{Q}{2p} = \frac{q2pm}{2p} = qm \quad (96)$$

Posunutí začátků jednotlivých fází proti sobě je u trojfázového vinutí 120° el = $2q$ drážkových roztečí.

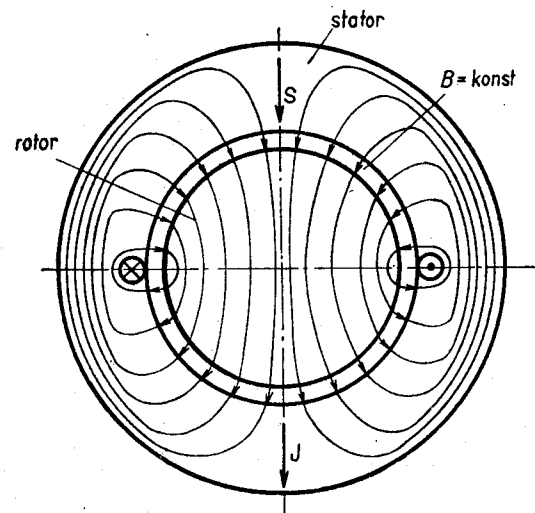
Trojfázové vinutí je rozloženo tak, že po obvodě stroje se v jedné vrstvě postupně střídá q drážek s předními cívkovými stranami (+) s q drážkami se zadními stranami (-) v pořadí

A, -C, B, -A, C, -B atd.

2.2.2. Vyšetřování průběhu magnetického pole

Aby bylo možné jednotlivé druhy vinutí porovnávat a hodnotit, musí se zjistit tvar a průběh jejich magnetického pole ve vzduchové mezeře.

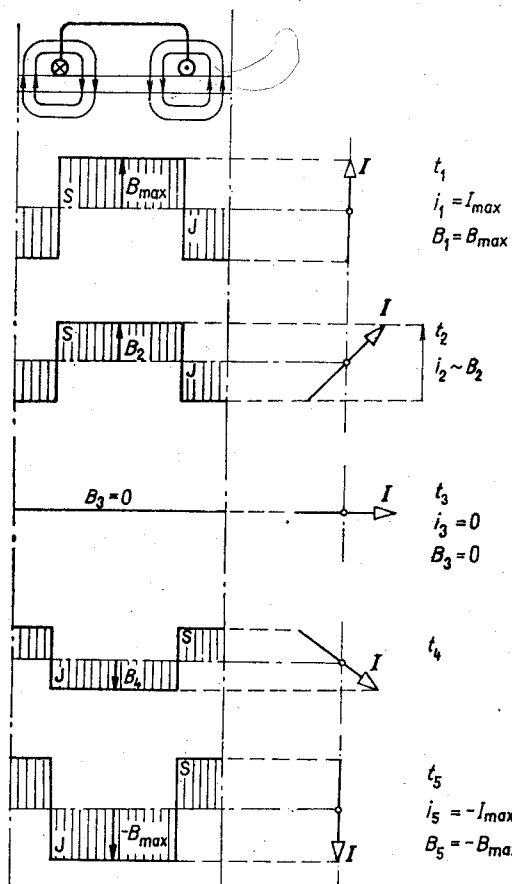
Magnetické pole se zobrazuje čarami, jejichž pořadí udává v určité míře velikost magnetické indukce v uvažovaném místě. Podle dohody bude pod severním pólem tato magnetická indukce kladná a nad osou (pod jižním pólem) záporná.



Obr. 44. Magnetické pole jedné cívky

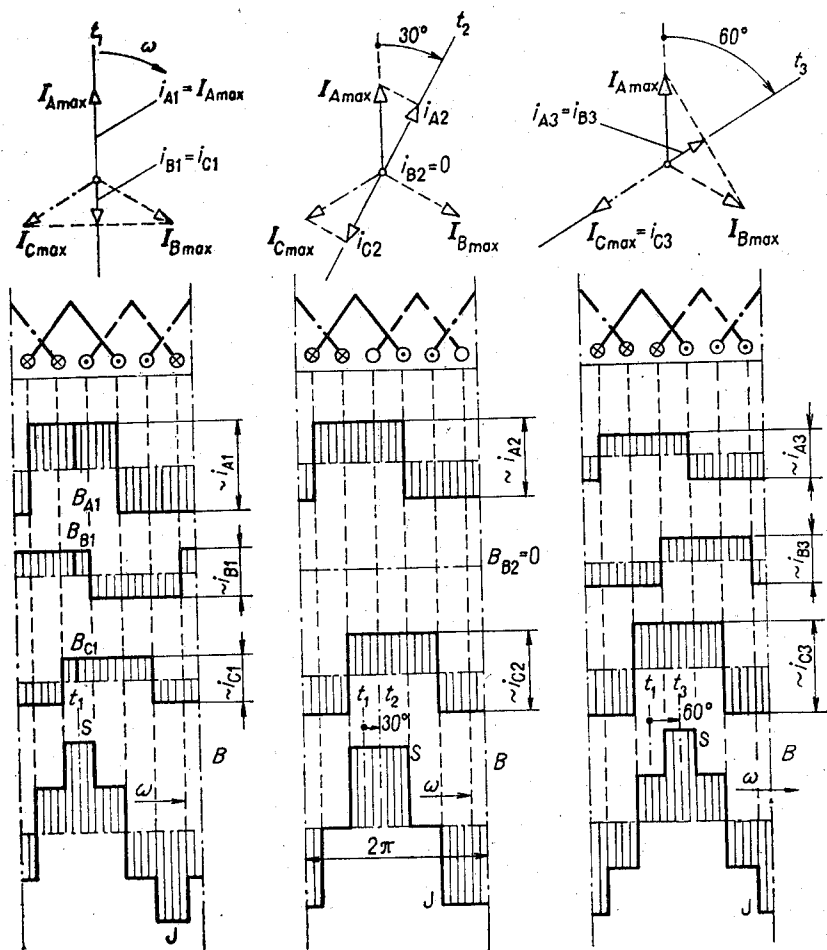
Jediná cívka podle obr. 44 by ve vzduchové mezeře vybudila stojaté dvupólové homogenní magnetické pole. Jestliže zanedbáme magnetický odpor železa, bude okamžitá hodnota magnetické indukce úměrná polovině okamžité hodnoty budícího proudu, protože jedna indukční čára prochází dvakrát vzduchovou mezerou.

Na obr. 45 je vyznačen průběh magnetické indukce pro různé okamžiky. Pole stojí, jen polarita a velikost magnetické indukce se s časem mění.



Obr. 45. Časová změna magnetického pole jedné cívky

Průběh magnetické indukce nejjednoduššího trojfázového vinutí se třemi cívkami (obr. 46) můžeme určit součtem okamžitých hodnot magnetických indukcí jednotlivých cívek, napájených trojfázovým proudem. V tomto případě se osa magnetického pole po obvodu posouvá o stejný úhel, o jaký se posune časová osa. Za jeden kmit, odpovídající 360° elektrickým, se posune o dvě pólové rozteče. Z nakreslených průběhů je též vidět, že průběh magnetické indukce se během jednoho kmity mění: od průběhu



Obr. 46. Točivé magnetické pole tří cívek napájených trojfázovým proudem

zubového přes obdélníkový průběh opět k průběhu zubovému (okamžiky $t_1 - t_2 - t_3$).

Skutečný průběh je plynulejší, neboť vodiče nejsou soustředěny do osy drážky, jak jsme to předpokládali při kreslení, ale tvoří souvislou proudovou vrstvu po celé její šířce. V rozpětí šířky drážky roste tedy buzení rovnoměrně, a ne skokem. Kromě toho bude skutečná magnetická indukce v ose pólu menší a na okrajích větší, neboť magnetický odpor železa při větší

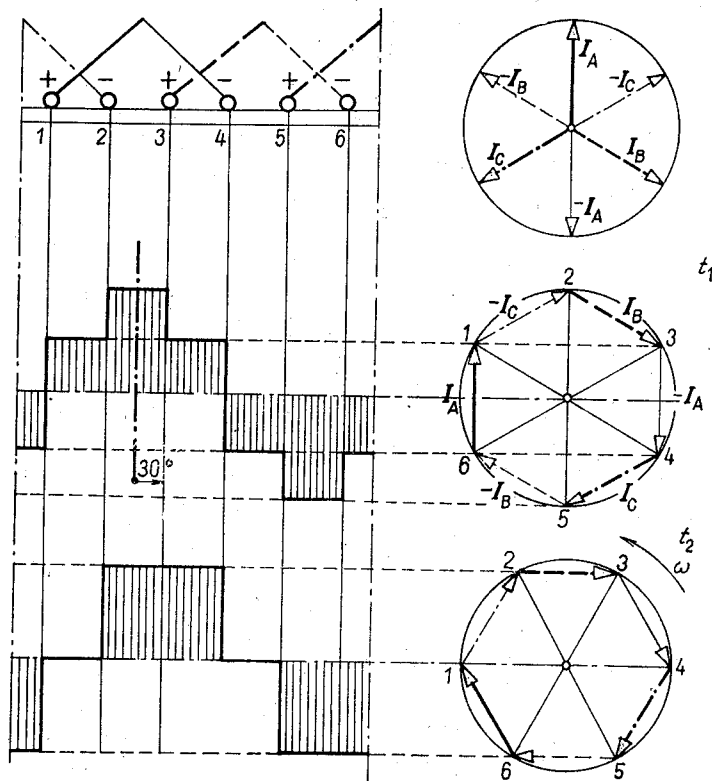
magnetické indukci v ose pólu je větší než na okrajích, kde je magnetická indukce menší.

Pro jednoduchost budeme v dalším výkladu předpokládat, že proudový obsah drážky je soustředěn do její osy.

2.2.3. Görgesův diagram

Průběh magnetomotorického napětí trojfázového vinutí lze bez zdlouhavého počítání určit přímo pomocí Görgesova diagramu (obr. 47).

Görgesův diagram je mnohoúhelník magnetomotorických napětí jednotlivých cívkových stran, vytvořený geometrickým součtem jejich maximálních hodnot v pořadí, jak vedle sebe následují po obvodu stroje.



Obr. 47. Görgesův diagram jednoduchého šestidrážkového vinutí

Protože je v každé drážce stejný počet vodičů a všemi vodiči procházejí proudy se stejnou maximální hodnotou, jsou fázory magnetomotorických napětí drážek stejné a můžeme je nahradit fázory proudů I_A, I_B, I_C .

Drážkám 1, 3, 5, ve kterých jsou uloženy přední cívkové strany, přísluší tedy magnetomotorická napětí úměrná proudům I_A, I_B, I_C a drážkám 2, 4, 6, ve kterých jsou zadní cívkové strany, přísluší tedy magnetomotorická napětí úměrná proudům $-I_A, -I_B, -I_C$.

Přitom proudy I_A, I_B, I_C jsou vůči sobě posunuty o 120° .

Görgesův diagram u nejjednoduššího trojfázového vinutí je šestiúhelník, tvořený stranami $I_A, -I_C, I_B, -I_A, I_C, -I_B$. Můžeme je označit i příslušnými čísly drážek, ke kterým náleží (1, 2, 3, 4, 5, 6). Vrcholy mnohoúhelníka se nazývají *mezidrážkové body*.

Průběh magnetomotorických napětí po obvodu stroje dostaneme promítáním mezidrážkových bodů mezi ty drážky, jejichž proudy se v nich protínají. Nulová osa prochází těžištěm Görgesova diagramu. Pro jiný okamžik získáme průběh magnetomotorických napětí tak, že Görgesův diagram se potočí okolo svého těžiště o příslušný úhel (obr. 47 — okamžik t_2).

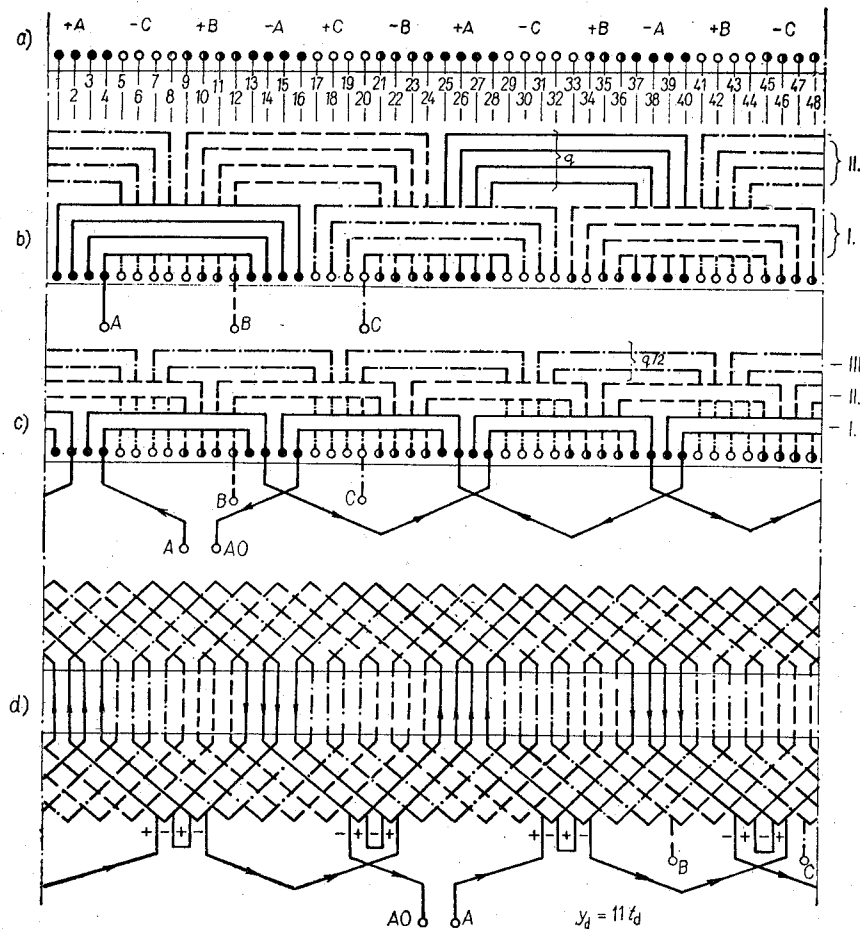
Ze samotného tvaru Görgesova diagramu můžeme i bez kreslení průběhu magnetomotorických napětí ohodnotit příslušná vinutí a určit jejich některé charakteristické veličiny.

Ze získaného průběhu magnetomotorických napětí vyplývá:

1. Magnetické pole buzené trojfázovým proudem se posouvá po obvodu stroje.
2. Průběh magnetomotorického napětí je zubovitý, podobný sinusoidě.
3. Průběh magnetomotorického napětí pod jedním pólem se periodicky mění, mezi dvěma krajními tvary (pulsuje).
4. Zubovitým průběhem a pulsováním magnetomotorického napětí se ve vinutí indukují proudy vyššího kmitočtu, tzv. *vyšší harmonické*, které svým působením ruší chod motoru.
5. Ideální je takové vinutí, které vybudí průběh magnetomotorického napětí co nejvíce podobný sinusoidě, tedy takový průběh, jehož Görgesův diagram se nejvíce blíží kružnici.
6. Vinutí se třemi cívkami (se šesti drážkami) má velmi špatné vlastnosti, neboť jeho Görgesův diagram je velmi málo podobný kružnici a jeho průběh magnetomotorického napětí se s časem velmi značně mění.
7. Vhodnější průběh magnetomotorického napětí je možné získat vinutím o větším počtu drážek a s vhodně zkráceným krokem.

2.2.4. Jednovrstvová vinutí

Při kreslení schématu jednovrstvového vinutí vycházíme z daných veličin q , m , $2p$, jimž odpovídá celkový počet drážek $Q = q2pm$. Drážky se očíslovují pořadovými čísly a vždy q drážek se přisoudí jednotlivým fázím podle schématu A, -C, B, -A, C, -B, atd. Toto rozdělení je stejné pro všechny



Obr. 48. Jednovrstvové vinutí: $q = 4$, $2p = 4$, $m = 3$:

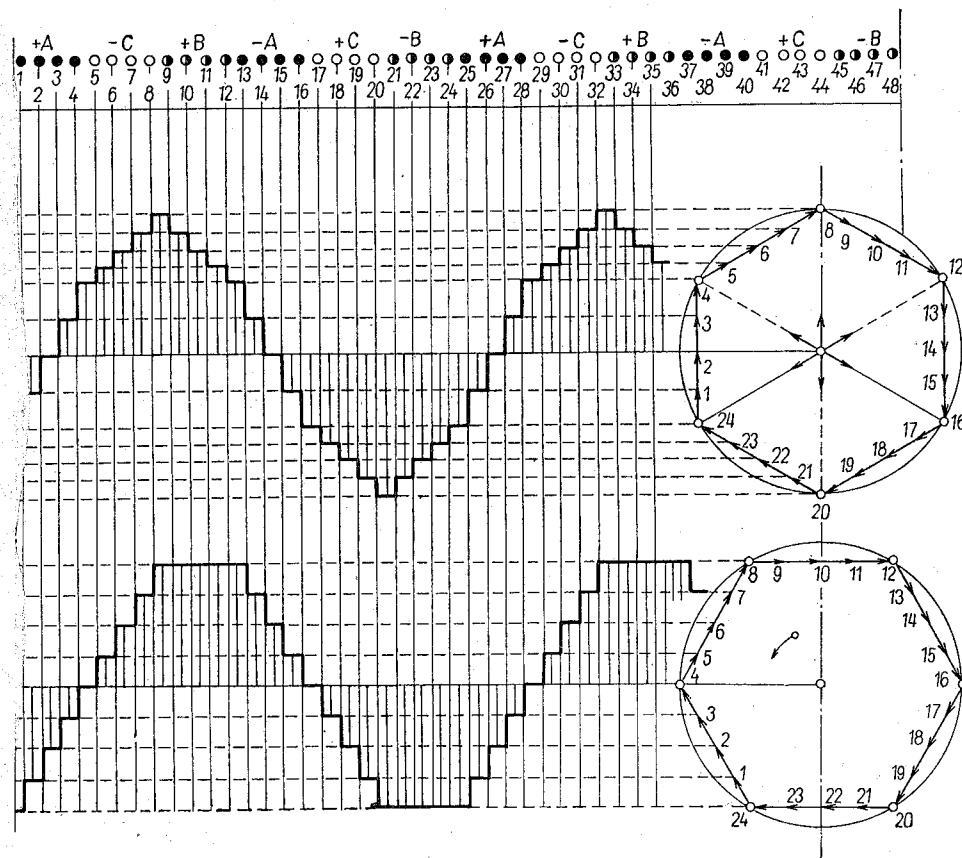
- a) základní rozdělení drážek fázím, b) soustředné vinutí pólpárové, dvoupolohové, c) soustředné vinutí pólové, trojpolohové, d) rozložené vinutí se stejnými cívkami

druhy jednovrstvových vinutí. Mění se pouze tvar cívek a čel. Cívka vznikne vždy spojením stran uložených ve dvou drážkách — kladné a záporné, které jsou od sebe vzdáleny o drážkový krok y_d .

Na obr. 48 jsou vyznačeny všechny užívané druhy jednovrstvových vinutí pro $q = 4$, $2p = 4$, $m = 3$.

Plný drážkový krok vinutí je $y_d = qm = 4 \cdot 3 = 12$ drážek a upraví se podle druhu vinutí. Začátky fází se posunou o 120° el, tedy o $2q = 2 \cdot 4 = 8$ drážek.

Görgesův diagram (obr. 49) je u každého druhu jednovrstvového vinutí a při jakémkoli q dán šestiúhelníkem. Zvětšování počtu drážek na pól



Obr. 49. Görgesův diagram jednovrstvového vinutí z obr. 48. Průběh magnetomotorického napětí je kreslen pro dvě krajní polohy

a fázi se průběh magnetomotorického napětí nepřiblíží víc sinusoidě (šestiúhelník — kružnice), jen se zmenší skoky v jeho křivce a zmenší se tvarová změna mezi dvěma krajními průběhy.

Na každé straně Görgešova diagramu je q mezidrážkových bodů (v daném případě čtyři).

Rozložení drážek po obvodu je pro každý dvojpól stejné, proto je i Görgešův diagram pro každý dvojpól stejný. Obrázec se po geometrickém sečtení drážkových fázorů proudů jednoho dvojpólu opakuje a průběh magnetomotorických napětí je pod všemi póly stejný.

Obyčejně se všechny cívky (nebo cívkové skupiny) jedné fáze zapojují do série. Začátek fáze A je možné dát do kterékoli drážky s přední stranou cívky (+). Začátky ostatních fází musí být potom od sebe posunuty o 120° el.

Někdy je výhodné posunout začátky o $120^\circ + 360^\circ$ el.

Spojení cívek jedné fáze může být provedeno libovolným způsobem, vždy se však musí záporná strana jedné cívky spojit s kladnou stranou další cívky. Je třeba volit takové zapojení, aby spojky byly co nejkratší a zbytečně se nekřížovaly.

U skupinových vinutí se celý cívkový svazek navine z jednoho souvislého vodiče, takže spojky mezi cívkami svazku se nemusí dodatečně zhotovovat, a proto nejsou ve schématu na obr. 48 zakresleny.

Správnost zapojení se kontroluje:

a) kreslením rozložení indukovaných napětí ve vinutí pod jednotlivými póly;

b) kreslením fázorové hvězdy drážkových napětí, jak bude vysvětleno u zlomkového vinutí.

Vinutí je tedy správně zapojeno, jestliže výsledné fázory drážkových napětí všech tří fází jsou stejné a jsou vůči sobě posunuty o 120° elektrických.

Na obr. 48 jsou vyznačeny obvyklé druhy jednovrstvových vinutí:

soustředné vinutí — pólparové, dvoupolohové (obr. 48b)

soustředné vinutí — pólové, trojpolohové (obr. 48c)

rozložené jednovrstvové se stejnými cívkami (obr. 48d)

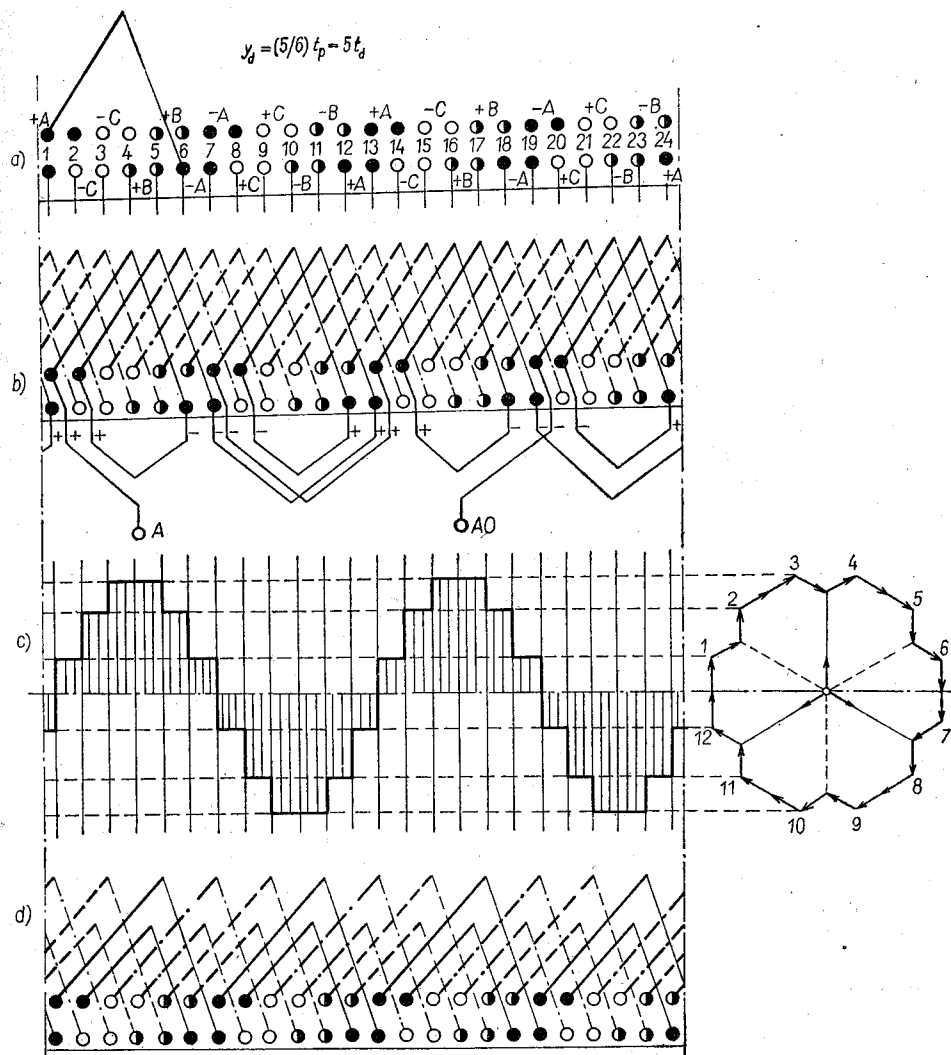
Vinutí byla popsána v prvním dílu učebnice.

2.2.5. Dvouvrstvová vinutí

2.2.5.1. Základní pojmy

Dvouvrstvová vinutí jsou výhodná proto, že se dají zhotovit s vhodně zkráceným krokem.

Postup při návrhu dvouvrstvového vinutí se zkráceným krokem a jeho různé zhotovení je na obr. 50.



Obr. 50. Dvouvrstvové vinutí se zkráceným krokem:

$$q = 2, 2p = 4, m = 3, y_d = (5/6) t_p.$$

- a) Základní rozdělení drážek fázím, b) vinutí se stejnými cívkami, c) Görgešův diagram, d) soustředné dvouvrstvové vinutí

1. Počet drážek je opět dán součinem $Q = q2pm$.

2. V každé drážce se vyznačí dvě strany cívky, uspořádané do dvou vrstev.

3. Rozdělení stran cívek jednotlivým fázím se vyznačí ve spodní vrstvě podle obvyklého schématu A, -C, B, -A, C, -B, atd.

4. Určíme plný krok, který je roven pólové rozteči a navrhne jeho zkrácení.

Nejvhodnější je zkrátit krok na $(4/5)t_p$, jak je vysvětleno v článku 2.2.11.

V nakresleném příkladě je $y_a = t_p = 2 \cdot 3 = 6$ a je zkrácen na $(4/5)t_p = (4/5) \cdot 6 = 5$ drážkových roztečí.

5. Z horní vrstvy první drážky nakreslíme cívku se zkráceným krokem tak, aby její zadní strana ležela v dolní vrstvě příslušné drážky. V příkladě je to drážka s číslem 6.

6. Nakreslením první cívky a určením její zadní strany je současně určeno i rozložení fází ve druhé vrstvě.

7. Cívky můžeme uspořádat několika způsoby.

Na obr. 50 jsou vyznačeny dva druhy magneticky rovnocenných vinutí: dvouvrstvové vinutí se stejnými cívkami (obr. 50b), dvouvrstvové vinutí soustředné (obr. 50d).

Jejich vlastnosti jsou uvedeny v prvním dílu učebnice.

2.2.5.2. Görgesův diagram dvouvrstvových vinutí

Diagram je znázorněn na obr. 50c. Tvoří se postupným geometrickým sčítáním magnetomotorických napětí jednotlivých cívkových stran. Výhodné je začít fázorem magnetomotorického napětí horní vrstvy v drážce. Každé drážce odpovídají dva fázory magnetomotorického napětí.

Při zkrácení kroku na $(4/5)t_p$ má Görgesův diagram tvar dvanáctiúhelníka. Průběh magnetomotorického napětí je blízký sinusoidě a jen velmi málo se mění.

Při nevhodném zkrácení kroku, např. na $(2/3)t_p$, změní se Görgesův diagram opět na šestiúhelník. Průběh magnetomotorického napětí se nezlepší, ale jen se zmenší magnetický tok jednoho pólu, takže pracnějším dvouvrstvovým vinutím se dosáhne horšího výsledku než jednoduchým jednovrstvovým vinutím.

2.2.5.3. Spojování dvouvrstvových vinutí

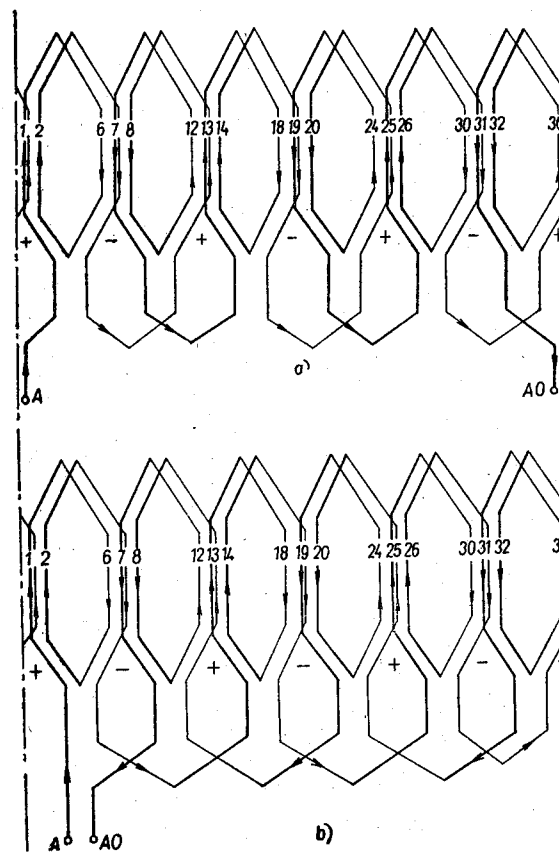
Cívky jedné fáze je možné spojovat spojkami:

- a) smyčkovými;
- b) vlnovými.

Při smyčkovém spojování se čelními spojkami spojují střídavě spodní strany se spodními a horní strany s horními stranami. Na obr. 51a je nakresleno dvouvrstvové vinutí pro $q = 2$, $2p = 6$, $m = 3$ se smyčkovými spojkami:

$$Q = q2pm = 2 \cdot 6 \cdot 3 = 36$$

$$y_a = (5/6)t_p$$



Obr. 51a. Zapojení jedné fáze dvouvrstvového vinutí se smyčkovými spojkami:

$$q = 2, 2p = 6, y_a = (5/6)t_p$$

b) Zapojení jedné fáze dvouvrstvového vinutí s vlnovými spojkami:

$$q = 2, 2p = 6, y_a = (5/6)t_p$$

Pro lepší názornost jsou nakresleny jen cívky fáze A. Zapojení ostatních fází je stejné. Horní a spodní strany cívky jsou rozlišeny různou tloušťkou čáry.

Skupina q cívek se nazývá dvojčívka, trojčívka, čtyřčívka apod., podle počtu drážek na pól a fázi.

U vlnového zapojení se spojují spodní cívkové strany s horními stranami, přičemž se napřed zapojí každá druhá cívková skupina. Vynechané skupiny se zapojí po obejítí p cívkových skupin pomocí zpětné spojky. Pořadí cívek je ve schématu očíslováno.

Vlnové spojky jsou výhodnější, neboť rovnoměrně obalují obvod stroje (obr. 51b).

2.2.5.4. Paralelní větve

U strojů na větší proudy vycházejí masivní vodiče, které bychom jen těžko mohli navíjet. Proto se vinutí zhotoví s paralelními větvemi. Paralelní větve je třeba volit tak, aby se v každé větvi indukovalo stejné napětí a každá větev měla stejný odpor a stejnou reaktanci. Paralelní větve musí být vedeny tak, abychom vyloučili vliv případné nesouměrnosti vzduchové mezery, kterou je ovlivněna velikost magnetického toku jednotlivých pólů.

Zásadně je možné vytvořit:

a) dvě paralelní větve, jestliže se do série spojí každá druhá cívková skupina; každá větev prochází celým obvodem stroje, takže vliv nerovnosti magnetických toků je vyloučen;

b) p paralelních větví, jestliže se do série spojí vždy dvě sousední cívkové skupiny; toto spojení se používá při větším počtu pólů, jestliže se žádá víc paralelních větví než dvě.

Vodiče velkého průřezu je možné vyloučit i tím, že se cívky navinou z několika tenčích vodičů paralelně.

2.2.5.5. Tyčové vinutí

Tyčové vinutí má cívku s malým počtem závitů (1 až 5) o velkém průřezu vodiče. Vznikne tak, že do drážek se vkládají vodiče tvořící aktivní strany a čela se vytvoří spájením až na samotném stroji. Aby výroba čel byla jednodušší, zhotoví se takové vinutí jako vlnové.

2.2.6. Zlomková vinutí

2.2.6.1. Základní pojmy

Zlomkové vinutí má počet drážek na pól a fázi dán zlomkem. Görgešův diagram má tvar velmi lomený a kružnici se podobá jen velmi málo. Průběh magnetomotorického napětí je velmi nepříznivý a magnetické toky jednotlivých pólů nejsou stejné. Proto zlomkové vinutí není vhodné pro indukční

motory. Motor se zlomkovým vinutím by měl hlučný a trhavý chod. Zlomkové vinutí vychází jen někdy, např. při převýšení motoru na jiné otáčky, nebo jestliže chceme při výrobě použít prostřihovač na plechy, které je k dispozici.

S výhodou se však zlomkové vinutí používá u synchronních generátorů, neboť i při nepravidelném průběhu magnetomotorického napětí dává napětí o průběhu blízkém sinusoidě. Používá se zejména u hydroalternátorů s velkým počtem pólů, u kterých by vyšel pro $q = 2$ velký počet drážek s malou šířkou. V takovém případě se volí počet drážek na pól a fázi menší než 2 a větší než 1.

Základní podmínkou pro zhotovení zlomkového vinutí je, aby pro určitý počet drážek na pól a fázi q vyšel na stroji celý počet cívek dělitelný počtem fází, tedy aby na každou fázi připadl stejný počet cívek.

U jednovrstvového vinutí platí:

počet drážek

$$Q = q2pm$$

počet cívek na stroji

$$n_c = \frac{Q}{2} = \frac{q2pm}{2} = qpm$$

počet cívek jedné fáze

$$n_{c1} = \frac{qpm}{m} = qp \text{ musí být celým číslem.}$$

Aby součin qp byl celým číslem, musí u jednovrstvového vinutí mít číslo q ve jmenovateli počet pólových dvojic p .

Např.: pro $2p = 4$, $p = 2$, je možné $q = 3/2, 4/2, 5/2$ atp.;
pro $2p = 6$, $p = 3$, je možné $q = 4/3, 5/3, 6/3, 7/3$ atp.

Pro dvouvrstvé vinutí platí:

počet drážek

$$Q = q2pm = n_c$$

počet cívek jedné fáze

$$n_{c1} = \frac{Q}{m} = \frac{q2pm}{m} = 2qp$$

musí být celým číslem.

Aby součin $2qp$ byl celým číslem, musí u dvouvrstvého vinutí mít číslo q ve jmenovateli počet pólů $2p$.

Např.: pro $2p = 4$ je možné $q = 5/4, 6/4, 7/4, 9/4$ atp.

Pozor!

Aby vinutí bylo souměrné, nesmí být po úplném zkrácení zlomku jmenovatel dělitelný počtem fází m .

Dvoustvrstvé zlomkové vinutí může být každého druhu, u jednovrstvových vinutí je možné zhotovit pouze některé druhy.

Při návrhu zlomkového vinutí je nutné přisoudit jedné fázi střídavě větší a menší počet drážek tak, aby průměrný počet drážek na pól a fázi se rovnal danému zlomkovému q . Např. pro $q = 2,5$ budou se jedné fázi střídavě přidělovat 2 a 3 drážky.

Dvoustvrstvé vinutí se snadněji navrhne než vinutí jednovrstvé, neboť u něj se přidělují drážky jednotlivým fázím jen v jedné poloze, bez ohledu na zadní strany cívek, jejichž rozdělení ve druhé poloze vyjde stejné.

Pro dosažení požadované souměrnosti zlomkového vinutí je někdy výhodné posunout začátky fází o $120^\circ + 360^\circ$ el.

Navrhování rozdělení drážek fázím zkusmo je zdoluhavé, a proto se k návrhu zlomkového vinutí používá zvláštní čtverečkový diagram nazvaný Tingleyovo schéma.

2.2.6.2. Tingleyovo schéma

Princip Tingleyova schématu vysvětlíme na příkladu.

Příklad 9

Navrhněte jednovrstvé zlomkové vinutí se stejnými cívkami pro $q = 5/2 = 2,5$; $2p = 4$; $m = 3$.

Počet drážek

$$Q = q2pm = 2,5 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 3 = 30$$

plný krok

$$y_a = qm = 2,5 \cdot 3 = 7,5$$

se upraví na nejbližší celý lichý krok, tedy

$$y_a = 7$$

jak to také vyžaduje jednovrstvé vinutí se stejnými cívkami.

Základní Tingleyovo schéma se skládá z tabulky (obr. 52a), která má tolik řádků, kolik pólů má vinutí. Řádky přísluší střídavě severnímu a jižnímu pólu. Šířka řádku odpovídá jedné pólové rozteči. Při celistvém počtu drážek na pól a fázi q je v každém řádku vyznačeno tolik čtverečků, kolik drážek připadá na jeden pól.

V příkladu připadá však na jeden pól necelý počet drážek $Q_p = qm = 2,5 \cdot 3 = 7,5$. Proto musíme tento počet násobit nejmenším možným celistvým násobkem tak, aby součin byl opět celým číslem. V tomto příkladě budeme toto číslo násobit dvěma, takže v jednom řádku bude $2 \cdot 7,5 = 15$ čtverečků. Drážce potom připadá každý druhý čtvereček.

U jednovrstvého vinutí se zapíše střídavě do každého druhého čtverečku číslo jen jedné cívkové strany. Začne se prvním čtverečkem, do kterého je možné jako první zapsat jakékoli číslo, např. číslo 1. Nejdříve se vyplní čtverečky prvního řádku a z něho se přejde do dalšího řádku.

S	1	2	3	4	5	6	7	8
J	9	10	11	12	13	14	15	
S	16	17	18	19	20	21	22	23
J	24	25	26	27	28	29	30	

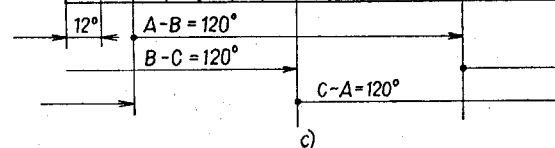
$$\tau_p = 2,75 = 15$$

a)

	1		3		5		7	
	9		11		13		15	
		17		19		21		23
			25		27		29	

b)

I. pól	1	9	2	10	3	11	4	12	5	13	6	14	7	15	8
II. pól	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	16	24	17	25	18	26	19	27	20	28	21	29	22	30	23
	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o



c)

Obr. 52. Tingleyovo schéma pro $q = 2,5$, $2p = 4$:

- a) základní schéma,
- b) schéma cívek,
- c) redukované schéma elementárních pólů

Jestliže se počet drážek na pól vyjádří nepravým zlomkem, udává jeho jmenovatel počet čtverečků na jednu drážku a číselník počet čtverečků na jeden pól.

V našem příkladu je

$$Q_p = 7,5 = 7\frac{1}{2} = \frac{15}{2}$$

z toho vyplývá, že na jednu drážku připadají dva čtverečky a 15 čtverečků připadá na jeden pól.

U jednovrstvého vinutí jsou při stejném kroku všechny cívky dokonale určeny polohou jejich předních stran, uložených v lichých drážkách. Můžeme tedy v Tingleyově schématu vynechat všechny sudé drážky a vznikne tak Tingleyovo schéma cívek (obr. 52b).

Cívky pro jednotlivé fáze se rozdělí tak, že Tingleyovo schéma cívek se rozdělí na tři stejné díly. Cívky s předními stranami v prvním dílu patří fázi A, ve druhém dílu fázi C a ve třetím dílu fázi B.

Zadní cívkové strany se určí přičtením kroku ($y_a = 7$) k číslům předních stran.

Podle obr. 52b budou jednotlivým fázím patřit cívkvy:

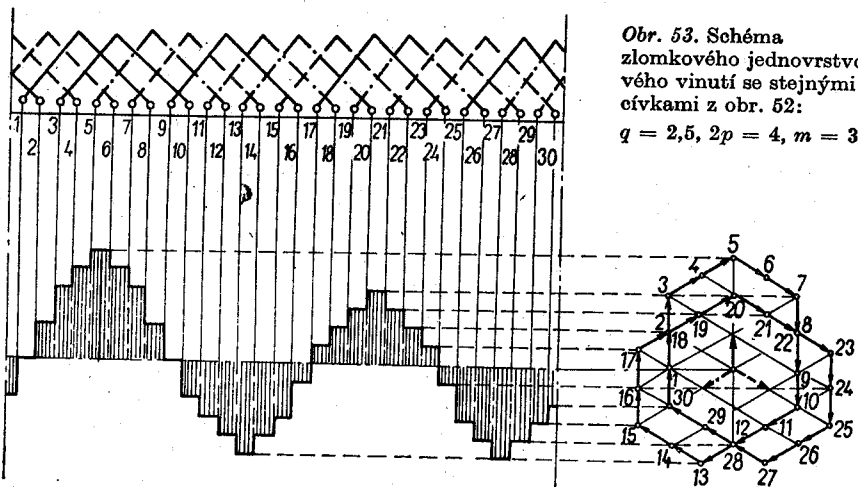
fáze A	fáze C	fáze B
1—8	21—28	11—18
9—16	29—6	19—26
17—24	7—14	27—4
25—2	15—22	5—12
3—10	23—30	13—20

Na základě tohoto rozpisu se sestrojí schéma vinutí podle obr. 53. Pro lepší souměrnost cívkových spojek jsou začátky fází posunuty o elektrický úhel $120^\circ + 360^\circ$.

$$120^\circ \text{ el} = 2q = 2 \cdot 2,5 = 5 \text{ drážek}$$

$$360^\circ \text{ el} = q2m = 2,5 \cdot 2 \cdot 3 = 15 \text{ drážek}$$

takže začátky se posunou o $5 + 15 = 20$ drážek.



Obr. 53. Schéma zlomkového jednovrstvového vinutí se stejnými cívkami z obr. 52: $q = 2,5, 2p = 4, m = 3$

Rozložení a počet drážek pod póly jsou různé

	A	B	C
S	3	2	2
J	3	3	2
S	2	3	3
J	2	2	3
Celkem	10	10	10

Stejný je jen celkový počet drážek na jednu fázi. Görgesův diagram (obr. 53) vychází velmi lomený a kružnici je jen málo podobný, ale při správně navrženém vinutí je vždy uzavřen.

Magnetické toky pólů, úměrné vyšrafovaným plochám, jsou nestejně a časově se velmi mění.

Jednovrstvové zlomkové vinutí je možné zhotovit i jako soustředné, se stejným rozložením drážek. Cívkové svazky mají potom různý počet cívek. V příkladu 9 by měly jednotlivé svazky střídavě 2 a 3 cívkvy.

U zlomkových vinutí je možné zapojit cívkvy jen do série. Paralelní zapojení je pro nesouměrnost magnetických toků vyloučeno.

Tingleyovo schéma se dá výhodně použít k určení tzv. činitele vinutí (čl. 2.2.7.3.), jestliže se redukuje na minimální počet elementárních pólů.

Redukované schéma vznikne tak, že v základním schématu se do volných čtverečků jednoho řádku zapíše čísla drážek sousedních severních a jižních pólů tak, aby všechny čtverečky byly vyplněny čísly. Takový rádek, úplně vyplněný čísly několika základních pólů, představuje tzv. elementární pól.

Z obr. 52a je vidět, že v daném příkladu tvoří jeden elementární pól dva základní póly stroje, takže celé vinutí je možné redukovat na dva elementární póly. Redukované schéma řešeného vinutí je na obr. 52c.

Pod čísla drážek se schematicky, např. různými kroužky, vyznačí příslušné cívkové strany a jejich přidělení fázím, jak to vychází ze schématu vinutí na obr. 53.

Pásmo všech fází obsahují stejný počet drážek a na šířku jsou stejně uspořádána. Osy pásem A, B, C jsou proti sobě posunuty o 120° el , v daném příkladě o 10 čtverečků. Z toho plyne, že výsledné napětí, indukované ve vinutí jednotlivých fází, bude stejně velké a posunutě o $1/3$ kmitu.

2.2.6.3. Fázorový diagram drážkových napětí

Správnost navrženého vinutí můžeme kontrolovat i fázorovým diagramem drážkových napětí, která se indukují v aktivních cívkových stranách točivým magnetickým polem.

Fázory drážkových napětí jsou proti sobě posunuty o úhel, odpovídající elektrickému úhlu mezi dvěma drážkami.

Jedna pólová dvojice (360° el) má $2qm$ drážek a drážkový úhel je dán vztahem

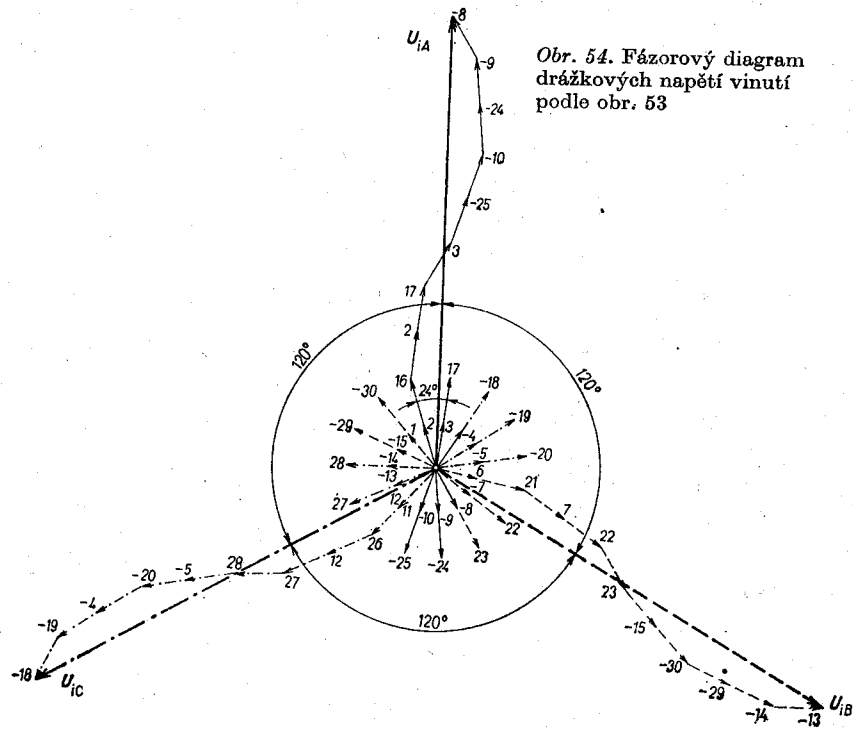
$$\alpha_d = \frac{360}{2qm} \quad [^\circ \text{ el}] \quad (97)$$

V příkladu 9 je

$$\alpha_d = \frac{360}{2 \cdot 2,5 \cdot 3} = \frac{360}{15} = 24^\circ \text{ el}$$

Fázory drážkových napětí první pólové dvojice tvoří tedy různici, která má 15 stejně dlouhých paprsků. S nimi splývají fázory druhé dvojice (obr. 54), protože v příkladě má každá dvojice stejný počet drážek (15) a drážkový úhel je celistvou částí úhlu 360° .

Při nestejném počtu drážek na pólovou dvojici není drážkový úhel celistvou částí úhlu 360° a fázorové různice napětí jednotlivých pólových



Obr. 54. Fázorový diagram drážkových napětí vinutí podle obr. 53

dvojic nesplynou. Fázory napětí druhé pólové dvojice vyjdou mezi fázory první dvojice.

Výsledná napětí jsou dána fázorovým součtem drážkových napětí příslušných fází. Fázory napětí záporných stran se ke kladným stranám přičítají v opačném směru, tak jako se v cívce sčítají kladná a záporná indukovaná napětí. Na pořadí sčítání nezáleží.

V obr. 54 je zvoleno takové pořadí, jež vyloučí zbytečné křížování fázorů, pro které by byl obraz méně přehledný. Aby se obraz vešel na papír a paprsky fázorové růžice nemusely být nepřehledně malé, sčítají se ve zmenšeném měřítku.

U správně navrženého vinutí jsou všechna tři napětí U_{iA} , U_{iB} , U_{iC} stejně velká a posunutá proti sobě o 120° .

2.2.6.4. Dvoustvrstvé zlomkové vinutí

Konstrukce Tingleyova schématu a fázorového diagramu drážkových napětí pro dvoustvrstvé vinutí se zhotoví opět podle následujícího příkladu.

Příklad 10

Navrhněte dvoustvrstvé zlomkové vinutí pro $2p = 4$, $m = 3$, $Q = 15$. Počet drážek na pól a fázi

$$q = \frac{Q}{2pm} = \frac{15}{4 \cdot 3} = \frac{5}{4} = 1\frac{1}{4}$$

Vinutí se dá zhotovit, neboť počet drážek na pól a fázi q má ve jmenovateli číslo $2p = 4$. Plný krok

$$y_a = mq = 3 \cdot \frac{5}{4} = 3,75$$

a zkrátí se na

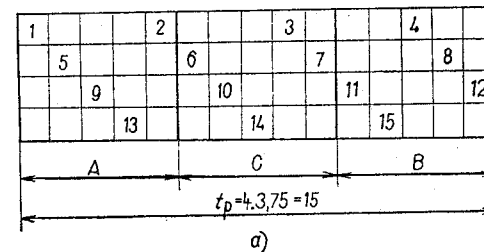
$$y_a = \frac{4}{5} \cdot 3,75 = 3$$

na jeden pól připadá

$$Q_p = mq = 3 \cdot \frac{5}{4} = 3,75 \text{ drážek}$$

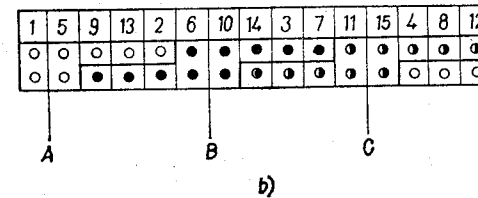
Tento výsledek je třeba násobit číslem 4, jinak by nevyšel v jednom řádku Tingleyova schématu celý počet čtverečků

$$4 \cdot 3,75 = 15$$



Obr. 55. Tingleyovo schéma dvoustvrstvého zlomkového vinutí:

$$q = 5/4, 2p = 4, m = 3, Q = 15$$



Základní schéma (obr. 55) má tedy čtyři řádky (čtyři základní póly) a v každém řádku 15 čtverečků. Na jednu drážku připadají čtyři čtverečky, takže čísla drážek se vpisují do každého čtvrtého čtverečku.

U dvoustvrstvého vinutí je v každé drážce jedna přední cívková strana, a tedy každé číslo drážky určuje jednu cívku. Základní schéma je současně schématem cívek. V něm se určí, ke kterým fázím cívky patří, a to opět rozdělením diagramu na tři části.

Rozdělení vyohází takto:

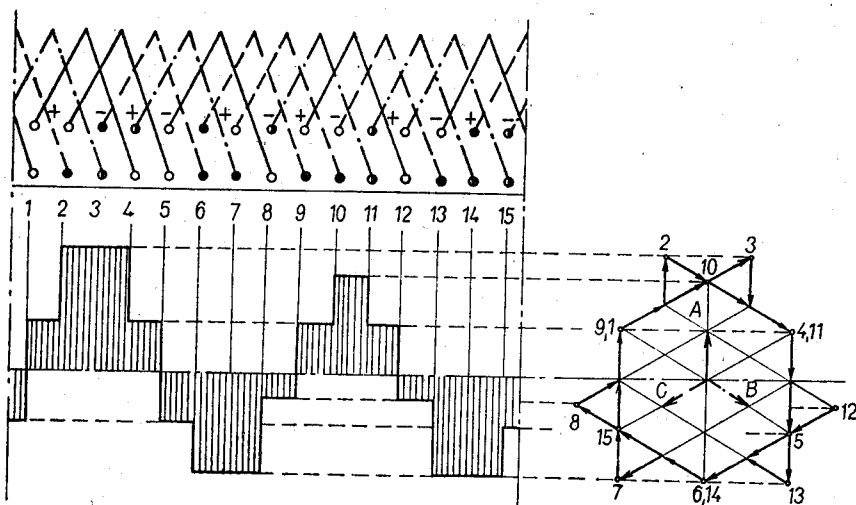
Fáze A má přední cívkové strany ve spodní vrstvě drážek 1, 2, 5, 9, 13.

Fáze B v drážkách 4, 8, 11, 12, 15.

Fáze C v drážkách 3, 6, 7, 10, 14.

Poloha zadních stran, uložených v horní vrstvě, se určí přičtením kroku $y_d = 3$ k číslům drážek předních stran.

Podle toho je pak sestaveno schéma vinutí na obr. 56.



Obr. 56. Dvourstvé zlomkové vinutí podle obr. 56:

$$q = 5/4, 2p = 4, m = 3, Q = 15$$

V Gorgesově diagramu jsou vždy mezi dvěma mezidrážkovými body dva fázory příslušející cívkovým stranám ve spodní a horní vrstvě.

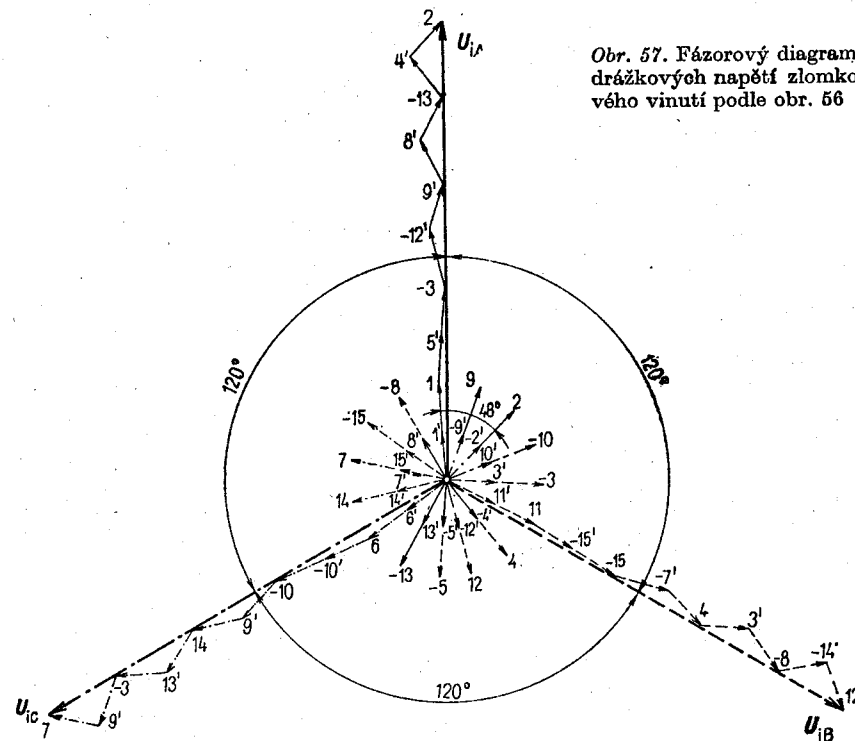
Ze základního schématu na obr. 55a je vidět, že všechny čtyři póly je možné redukovat na jeden elementární pól (obr. 55b), ve kterém se zakreslí pro každou drážku dvě cívkové strany a jejich příslušnost fázím se vyznačí dohodnutým způsobem. Fázová pásma opět vycházejí stejná a posunutá o 120° .

Drážkový úhel je

$$\alpha_d = \frac{360}{2 \cdot 1,25 \cdot 3} = \frac{360}{7,5} = 48^\circ \text{ el}$$

Protože drážkový úhel není celistvým podílem úhlu 360° , vycházejí fázory druhé dvojice mezi fázory první pólkové dvojice (obr. 57).

Obr. 57. Fázorový diagram drážkových napětí zlomkového vinutí podle obr. 56



2.2.7. Činitel vinutí

2.2.7.1. Význam

Pro napětí indukované točivým magnetickým polem ve vinutí jedné fáze byl odvozen vztah

$$U_1 = \pi \sqrt{2} \Phi_f N_s k_v \approx 4,44 \Phi_f N_s k_v \quad [\text{V}; \text{Wb}, \text{Hz}] \quad (98)$$

kde k_v je činitel vinutí, který vyjadřuje zmenšení indukovaného napětí vlivem zkrácení kroku a rozložení vinutí do drážek; je dán poměrem geometrického součtu drážkových napětí k jejich součtu aritmetickému

$$k_v = \frac{U_1}{\sum U_{1d}} \quad (99a)$$

2.2.7.2. Grafické určení činitele vinutí k_v

Nejjednodušeji je možné zjistit činitele vinutí k_v z nakresleného fázorového diagramu drážkových napětí podle rovnice (99a).

Příklad 11

Určete činitele vinutí pro vinutí nakreslené na obr. 56. Fázorový diagram drážkových napětí tohoto vinutí je na obr. 57.

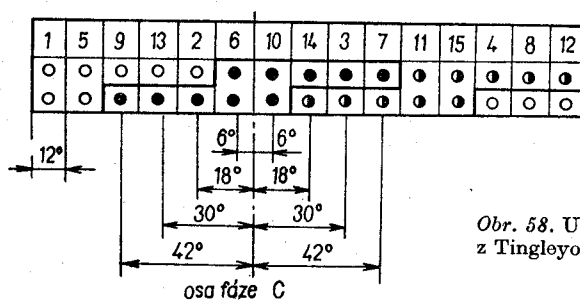
Přímým měřením z původního obrázku vychází $U_1 \sim 60$ mm, $U_d \sim 6,5$ mm a činitel vinutí

$$k_v = \frac{60}{10 \cdot 6,5} \approx 0,92$$

Z fázorového diagramu můžeme určit činitele vinutí k_v i matematicky, jestliže výsledné napětí vypočteme z průmětu všech drážkových napětí do jeho směru.

2.2.7.3. Určení činitele vinutí z Tingleyova schématu

Činitele vinutí můžeme určit z Tingleyova schématu, ve kterém bez grafického řešení přímo vychází poloha drážkových napětí vzhledem k výslednému indukovanému napětí. Tato poloha je dána úhlovou polohou čtverečků jedné fáze vůči ose příslušného pásma.



Obr. 58. Určení činitele vinutí z Tingleyova schématu

Příklad 12

Určete činitele vinutí k_v z obr. 56 pomocí Tingleyova schématu. Toto schéma je ještě jednou překresleno na obr. 58.

Jednomu čtverečku odpovídá úhel

$$\frac{180^\circ}{15} = 12^\circ$$

Jestliže vyznačíme v Tingleyově schématu posuny drážek jednoho fázového pásma, např. fáze C, vzhledem k jeho ose, je vidět, že mají

čtyři cívkové strany posun 6°
dvě cívkové strany posun 18°
dvě cívkové strany posun 30°
dvě cívkové strany posun 42°

a činitel vinutí bude tedy

$$k_v = \frac{4 \cos 6^\circ + 2 \cos 18^\circ + 2 \cos 30^\circ + 2 \cos 42^\circ}{10} \approx 0,91$$

Poznámka. Činitel vinutí z Tingleyova schématu nebo z fázorového diagramu drážkových napětí se musí určovat zejména u zlomkových vinutí, u nichž není možné odvodit jednodušší vztahy.

2.2.7.4. Matematické řešení

Činitel vinutí se rozloží na dvě složky (činitele):

k_{vr} činitel rozlohy (počtu drážek)
 k_{vy} činitel zkrácení kroku

přičemž platí

$$k_v = k_{vr} k_{vy} \quad (99b)$$

a) Činitel rozlohy vyjadřuje snížení indukovaného napětí rozložením vodičů pod jedním pólem do q drážek.

Toto snížení vyplývá z obr. 59a, na kterém jsou pod jedním pólem čtyři drážky jedné fáze. Poloha pólu odpovídá okamžiku, kdy se ve fázi A indukuje nejvyšší napětí.

Kdyby byly všechny vodiče pod jedním pólem soustředěny v jediné drážce v ose pólu, bylo by indukované napětí úměrné magnetické indukci B_{max} . Na obrázku vidíme, že u rozloženého vinutí je výsledné napětí dáno součtem U_{d1} až U_{d4} menší, neboť drážková napětí jsou úměrná menším magnetickým indukčním B_1, B_2, B_3, B_4 .

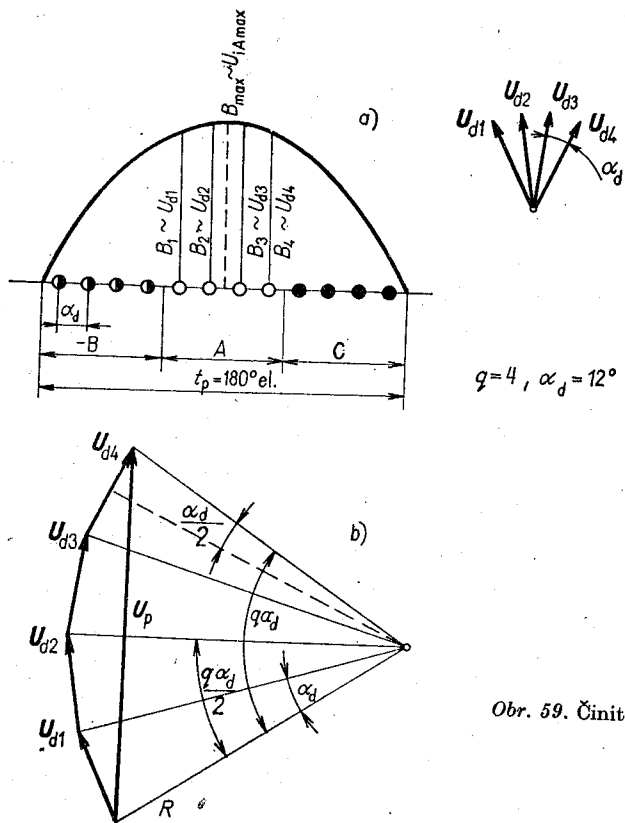
Je-li uspořádání vodičů pod všemi póly stejné, stačí zjistit vliv rozložení pod jedním pólem.

Pro q drážek na pól a fázi je podle rovnice (97) drážkový úhel

$$\alpha_d = \frac{360^\circ}{2qm} = \frac{180^\circ}{qm}$$

Na obr. 59b je indukované napětí jedné fáze pod jedním pólem U_p dáno geometrickým součtem čtyř fázorů U_d a činitel rozlohy je dán poměrem

$$k_{vr} = \frac{U_p}{qU_d}$$



Obr. 59. Činitel rozlohy

Velikost napětí U_p i U_d můžeme vyjádřit pomocí délky R , která je dána poloměrem kružnice opsané kolem fázorů napětí U_d

$$U_p = 2R \sin \frac{q\alpha_d}{2} = q 2R \sin \frac{\alpha_d}{2}$$

takže činitel rozlohy

$$k_{vr} = \frac{2R \sin \frac{q\alpha_d}{2}}{q 2R \sin \frac{\alpha_d}{2}}$$

po dosažení za drážkový úhel α_d a po úpravě dostaneme

$$k_{vr} = \frac{2R \sin \frac{q 180^\circ}{2qm}}{q 2R \sin \frac{180^\circ}{2qm}} = \frac{\sin \frac{90^\circ}{m}}{q \sin \frac{90^\circ}{qm}} \quad (100)$$

Pro obvyklý počet fází $m = 3$ a $\sin 30^\circ = 0,5$ vychází činitel rozlohy

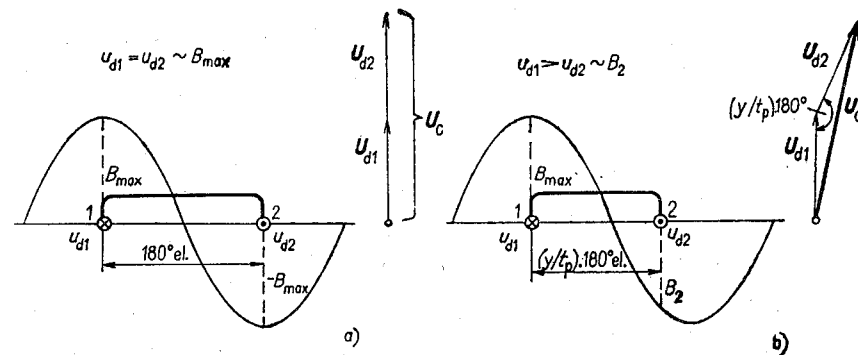
$$k_{vr} = \frac{\sin \frac{90^\circ}{3}}{q \sin \frac{90^\circ}{3q}} = \frac{\sin 30^\circ}{q \sin \frac{30^\circ}{q}} = \frac{1}{2q \sin \frac{30^\circ}{q}} \quad (101)$$

Pro $q = 1$ je činitel rozlohy

$$k_{vr} = \frac{1}{2 \sin 30^\circ} = \frac{1}{2 \cdot 0,5} = 1$$

b) Činitel zkrácení kroku vyjadřuje zmenšení indukovaného napětí způsobené zkrácením kroku.

Pro zkrácený krok (obr. 60) v poměru y/t_p je úhel mezi drážkovými napětími jedné cívky nikoli 180° , ale jen $(y/t_p) \cdot 180$ a cívkové napětí, dané rozdílem dvou fázorů napětí U_d , je menší než při plném kroku.



Obr. 60. Činitel zkrácení kroku

Z fázorového diagramu vychází velikost cívkového napětí

$$U_c = 2U_d \sin \left(\frac{y}{t_p} \cdot \frac{180^\circ}{2} \right) = 2U_d \sin \left(\frac{y}{t_p} \cdot 90^\circ \right)$$

Činitel zkrácení kroku je dán poměrem

$$k_{vy} = \frac{U_c}{2U_d} = \frac{2U_d \sin\left(\frac{y}{t_p} \cdot 90^\circ\right)}{2U_d}$$

a po úpravě vychází

$$k_{vy} = \sin\left(\frac{y}{t_p} \cdot 90^\circ\right) \quad (102)$$

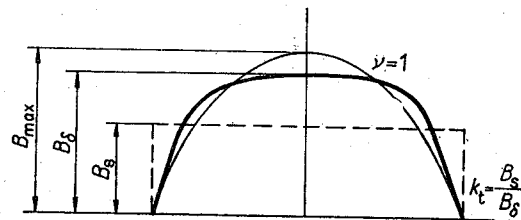
Pro plný krok je $y/t_p = 1$ a činitel zkrácení kroku bude

$$k_{vy} = \sin(1 \cdot 90^\circ) = 1$$

2.2.8. Činitel tvaru

V rovnici pro výpočet magnetického toku pólu vycházíme ze sinusového průběhu první harmonické.

V praxi respektujeme zploštění křivky magnetického toku, vyvolané větším magnetickým odporem v ose pólu, který odpovídá větší magnetické indukci a menším magnetickým odporem na jeho okrajích. Tato deformace se vyjadřuje činitelem tvaru k_t , který je různě definován (obr. 61).



Obr. 61. Činitel tvaru

Pro výpočty v praxi je výhodné definovat činitel tvaru poměrem střední magnetické indukce B_s a amplitudy skutečné magnetické indukce ve vzduchové mezeře B_δ

$$k_t = \frac{B_s}{B_\delta} \quad (103)$$

Činitel tvaru (plnění pólové křivky) můžeme vyjádřit v závislosti na výkonu stroje (139). Pro čistě sinusový průběh je činitel tvaru

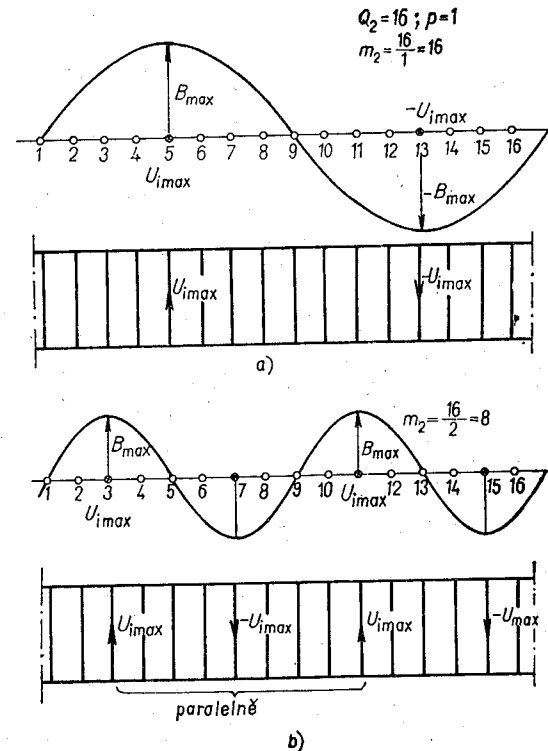
$$k_t = \frac{2}{\pi} \quad (103)$$

Jestliže vycházíme z amplitudy skutečného deformovaného magnetického toku, je jeho velikost

$$\Phi_t = k_t B_\delta t_p l_e \quad (104)$$

2.2.9. Klec jako mnohofázové vinutí

Zvláštním případem vinutí je rotorová klec indukčních motorů. Skládá se z Q_2 stejných tyčí, spojených po obou stranách rotoru masívními kruhy, takže představuje vinutí s Q_2 paralelně spojenými vodiči.



Obr. 62. Klec v magnetickém poli:
a) dvoupólovém,
b) čtyřpólovém

Točivé magnetické pole indukuje v každé tyči střídavé napětí. Napětí jednotlivých tyčí, která se uzavírají spojovacími kruhy, jsou proti sobě posunuta o úhel

$$\alpha_{d2} = \frac{180^\circ}{Q_{p2}} \quad (105)$$

kde $Q_{p2} = \frac{Q_2}{2p}$ je počet tyčí na jeden pól.

Okamžitá napětí jsou úměrná magnetickým indukcím magnetického pole, ve kterém se právě nacházejí.

U klece ve dvoupólovém magnetickém poli (obr. 62a) se kladná maximální hodnota napětí indukuje postupně vždy v jediné tyči, která se právě nachází v ose severního pólu. Představuje tedy každá tyč samostatnou fázi a vlastní dvoupólová klec představuje vinutí o Q_2 fázích.

Ve čtyřpólovém magnetickém poli (obr. 62b) tvoří jednu fázi vždy dvě tyče, protože vždy ve dvou tyčích se indukuje maximální a kladné napětí (dva severní póly). Pro lepší názornost předpokládáme sudý počet tyčí.

Obecně v magnetickém poli o $2p$ pólech patří k jedné fázi p tyčí paralelně zapojených, takže klec má počet fází daný vztahem

$$m_2 = \frac{Q_2}{p} \quad (106)$$

a počet drážek na pól a fázi

$$q_2 = \frac{p}{2p} = \frac{1}{2}$$

V každé fázi je do série zapojen jen jeden vodič, takže činitel vinutí je

$$k_{v2} = 1$$

Formální počet závitů, zapojených u klece do série, je

$$N_{s2} = \frac{1}{2}$$

2.2.10. Harmonická analýza

Periodický, ale nesinusový průběh, např. zubový průběh magnetomotorického napětí trojfázového vinutí, můžeme podle Fouriéra nahradit nekonečným počtem sinusovek a kosinusovek (vyšších harmonických) s různou amplitudou a s různou délkou vlny.

První harmonická má největší amplitudu a kmitočet i délku vlny shodné se základním průběhem. Další harmonické mají amplitudy postupně menší a délky vln jsou dány zlomkem délky základní harmonické.

Jestliže je základní průběh souměrný podle osy x , vymizí z Fourièrovy řady všechny sudé harmonické, a jestliže je průběh souměrný i podle amplitudy, zmizí i všechny kosinusové členy.

Průběhy magnetomotorických napětí, proudů, napětí, které se vyskytují v elektrických strojích, jsou obyčejně souměrné podle osy x i podle amplitudy, takže obsahují jen liché harmonické.

Jestliže se dá periodický průběh vyjádřit analytickou funkcí

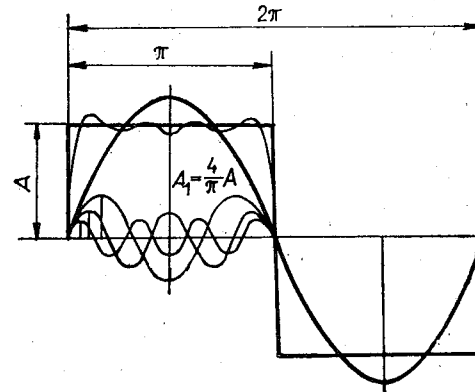
$$y = f(x); \quad x = \omega t$$

je amplituda v té harmonické obecně dána výrazem

$$A_v = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin vx \cdot dx \quad (107)$$

který můžeme pro průběhy souměrné podle osy x i podle amplitudy upravit na tvar

$$A_v = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} f(x) \sin vx \cdot dx \quad (108)$$



Obr. 63. Rozklad obdélníkového průběhu na vyšší harmonické

Pro velmi častý obdélníkový průběh, daný v intervalu 0 až π (obr. 63) rovnicí $y = A$, vychází amplituda v té harmonické

$$A_v = \frac{4}{v\pi} A \quad (109)$$

Pro první harmonickou obdélníkového průběhu je

$$A_1 = \frac{4}{\pi} A \quad (110)$$

Amplitudy vyšších harmonických jsou

$$A_3 = \frac{4}{3\pi} A$$

$$A_5 = \frac{4}{5\pi} A; \text{ atd.}$$

Amplituda ν té harmonické je vždy ν krát menší než amplituda první harmonické.

Zubový průběh magnetomotorického napětí, je-li buzené trojfázovým proudem, nemá harmonické dělitelné třemi, neboť fázový posun vinutí je $3 \times 120^\circ$.

Jeho rozklad na vyšší harmonické můžeme uskutečnit jako rozklad několika obdélníkových průběhů s různou amplitudou a různou šířkou.

Jestliže jde o průběh, který se nedá vyjádřit analytickou funkcí, použijeme k rozkladu některých existujících grafických metod.

K harmonické analýze můžeme použít i tzv. mechanické analyzátoři. Při jejich použití se pohyblivým hrotem obejde obrys průběhu a zařízení ukáže přímo amplitudy vyšších harmonických.

Podobně můžeme tento rozklad udělat i elektrickými metodami, jestliže se rozkládaný průběh přivede na svorky příslušného počítačícího stroje.

2.2.11. Vliv vyšších harmonických

Dříve uvedené vztahy pro veličiny U_1 a k_ν platí jen pro první harmonickou, získanou rozkladem neharmonického průběhu magnetického toku.

Vyšší harmonické obsažené v křivce magnetického toku indukují do vinutí vyšší harmonická napětí. Jejich kmitočet je stejný jako kmitočet sítě, neboť kolikrát je kratší délka vlny některé vyšší harmonické, tolikrát je menší úhlová rychlost.

Pólová rozteč ν té harmonické je

$$t_{p\nu} = \frac{t_p}{\nu}$$

Tomu odpovídá magnetický tok

$$\Phi_\nu = \frac{2}{\pi} B_p l_e t_{p\nu}$$

kde B_p je amplituda magnetické indukce příslušné harmonické křivky, určené rozkladem pomocí Fourierovy řady.

Efektivní napětí indukované tímto magnetickým tokem je dáno vztahem

$$U_{1\nu} = \pi \sqrt{2} \Phi_\nu f N_s k_{\nu\nu} \quad (111)$$

Činitel vinutí je opět

$$k_{\nu\nu} = k_{\nu r} k_{\nu y}$$

přičemž činitele rozlohy a činitele kroku můžeme určit z rovnic (101) a (102), jestliže se všechny úhlové míry násobí číslem ν , neboť pro ν krát menší pólovou rozteč jsou všechny elektrické úhly ν krát větší

$$k_{\nu r} = \frac{1}{2q \sin \nu \frac{30^\circ}{q}} \quad (112)$$

$$k_{\nu y} = \sin \left(\frac{y}{t_p} \nu 90^\circ \right) \quad (113)$$

Podle čl. 2.2.10 obsahují křivky magnetických toků, buzených trojfázovým proudem a souměrných podle osy x i podle amplitudy, jen první, pátou, sedmou, jedenáctou atd. harmonickou. Podle toho nejbližší vyšší harmonická je pátá. Velmi výhodně ji můžeme zrušit zkrácením kroku na $4/5$ pólové rozteče, pro kterou je podle (113) činitel kroku

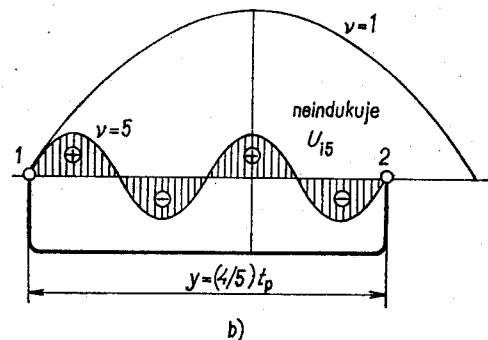
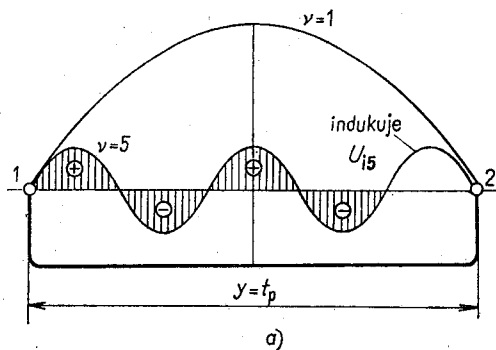
$$k_{\nu y 5} = \sin \left(\frac{4}{5} \cdot 5 \cdot 90^\circ \right) = \sin 360^\circ = 0$$

Amplitudy indukovaných napětí vyšších harmonických jsou značně menší, než by to odpovídalo amplitudě magnetické indukce příslušné harmonické, takže jen málo ovlivní tvar křivky výsledného indukovaného napětí. Vysvětluje to obr. 64a, ve kterém je zakresleno pět půlvln páté harmonické magnetického toku v rozpětí jedné cívky s plným krokem. Účinek dvou kladných a dvou záporných půlvln se ruší a indukované napětí páté harmonické je indukováno jen jedinou půlvlnou.

Na obr. 64b je vidět, jak je možné její účinek zrušit zkrácením kroku na $(4/5) t_p$.

Vliv vyšších harmonických v křivce magnetického toku se projeví i v chodu motoru. Vyšší harmonické vytvářejí svoje vlastní parazitní momenty, které jistým způsobem působí na moment první harmonické. Dá se dokázat, že momenty páté a jedenácté harmonické působí proti momentu první harmonické, jen moment sedmé harmonické, která se otáčí souhlasně s první harmonickou, ho podporuje.

Parazitní momenty a tím i hluk motoru můžeme omezit vhodnou volbou rotorového vinutí a zešíkmením jeho drážek. Konkrétní údaje jsou uvedeny v čl. 3.1.2.22.



Obr. 64. Vliv zkrácení kroku na $(4/5)t_p$

2.2.12. Diferenční rozptyl

Diferenční rozptyl je mírou jakosti vinutí. Vyjadřuje se jím vliv vyšších harmonických v křivce magnetického toku na velikost indukovaného napětí první harmonické.

Vyšší harmonické představují točivá magnetická pole o amplitudě magnetické indukce

$$B_\nu = \frac{B_1}{\nu} \quad (114)$$

a s pólovou roztečí

$$t_{p\nu} = \frac{t_{p1}}{\nu} \quad (115)$$

Za poloviční dobu kmitu se základní harmonická magnetického toku posune o pólovou rozteč t_{p1} a za tentýž čas se o svou pólovou rozteč $t_{p\nu}$

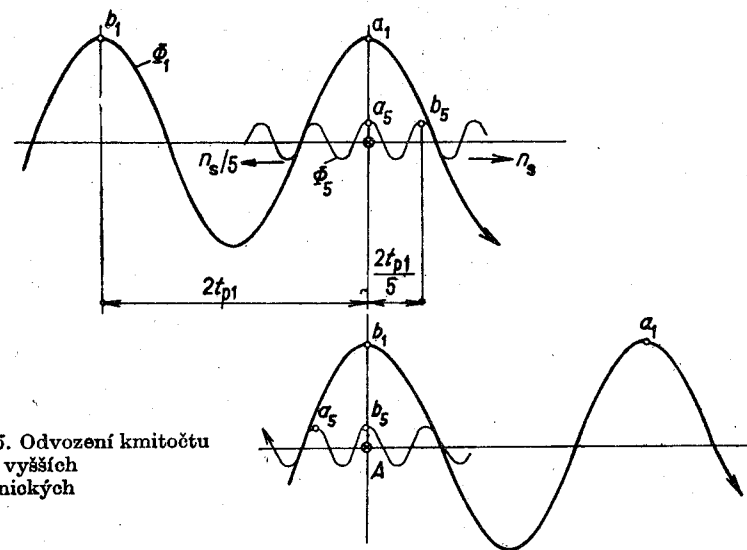
posune i magnetický tok vyšší harmonické. Tak např. magnetický tok páté harmonické se posune o pětinu pólové rozteče první harmonické.

To znamená, že synchronní otáčky vyšších harmonických jsou menší než otáčky magnetického pole první harmonické

$$n_{s\nu} = \frac{n_{s1}}{\nu} \quad (116)$$

Nakreslením průběhu vyšších harmonických pro některé okamžiky lze dokázat, že pátá harmonická a jedenáctá harmonická obíhají proti směru točení první harmonické, ale sedmá harmonická obíhá ve stejném směru jako první harmonická.

Vyššími harmonickými magnetickými toky se indukují ve statorovém vinutí vyšší harmonická napětí, jejichž kmitočet se rovná kmitočtu první harmonické, jak je vidět z obr. 65. Na obr. 65 je nakreslen průběh mag-



netického toku první a páté harmonické. Vodič A statorového vinutí je právě v ose pólu první a páté harmonické. Za dobu jednoho kmitu se magnetický tok Φ_1 posune o $2t_{p1}$ doprava a tok Φ_5 o jednu pětinu doleva, takže vodič A se zase dostane do osy severních pólů první a páté harmonické a indukují se v něm opět maximální hodnoty napětí obou harmonických, tzn. že jejich kmitočet je stejný.

Indukovaná napětí vyšších harmonických se sčítají s napětím první harmonické. Výsledné indukované napětí odpovídá skutečnému průběhu

magnetického toku ve vinutí. Je tím menší, čím větší jsou napětí vyšších harmonických.

Zmenšení napětí vyjadřujeme dohodnutým úbytkem napětí na fiktivní reaktanci X_{dif} , nazvané *reaktance diferenčního rozptylu* podobně jako se úbytkem napětí na rozptylových reaktancích nahrazují napětí indukovaná rozptylovými magnetickými toky. Název je v tomto případě jen dohodnutým pojmem, neboť úbytek napětí na reaktanci X_{dif} není vyvolán rozptylovým magnetickým tokem, ale vlastně částí hlavního toku.

Reaktance diferenčního rozptylu se vyjadřuje jako část magnetizační reaktance X_{μ} , úměrné magnetizačnímu proudu (viz první díl této učebnice),

$$X_{\mu} = \frac{U_1}{I_{\mu}} \quad (117)$$

a je dána vztahem

$$X_{dif} = \sigma_{dif} X_{\mu} \quad (118)$$

kde σ_{dif} je tzv. činitel diferenčního rozptylu.

Rovnice (118) platí jen pro nekonečnou vodivost železa. Skutečná reaktance diferenčního rozptylu se podle Kronkla zvětšuje s magnetickou indukcí železa, která se vyjadřuje poměrem celkového magnetomotorického napětí F k magnetickému napětí pro vzduchovou mezeru U_{δ} , takže dostaneme vztah

$$X_{dif} = \sigma_{dif} \frac{F}{U_{\delta}} X_{\mu} \quad (119)$$

Činitel diferenčního rozptylu závisí na zkrácení kroku a na počtu drážek na pól a fázi. Pro trojfázová vinutí je uveden v tab. 9.

Z tab. 9 je vidět, že činitel σ_{dif} a tedy i vliv vyšších harmonických je nejmenší pro zkrácení kroku blízkému poměru 4/5, což odpovídá článku 2.2.11. Současně velmi klesá s počtem drážek na pól a fázi. Proto je výhodné volit počet drážek na pól a fázi co největší, nejméně $q = 3$.

Pro klecové vinutí je podle Kronkla činitel diferenčního rozptylu dán výrazem

$$\sigma_{dif} = \frac{3,3p^2}{Q_2^2} \quad (120)$$

Činitel diferenčního rozptylu stanovíme zvlášť pro stator a zvlášť pro rotor.

Reaktance diferenčního rozptylu potom je (přepočteno na stator)

$$X_{dif1} = \sigma_{dif1} \frac{F}{U_{\delta}} \cdot \frac{U_1}{I_{\mu}} \quad (121)$$

$$X_{dif21} = \sigma_{dif2} \frac{F}{U_{\delta}} \cdot \frac{U_1}{I_{\mu}} \quad (122)$$

Tabulka 9. Činitel diferenčního rozptylu

q	Zkrácení kroku	σ_{dif}	q	Zkrácení kroku	σ_{dif}	
1,5	4/4,5	0,045590	4,5	13/13,5	0,006897	
	3/4,5	0,058150		12/13,5	0,005809	
	2/4,5	0,067100		11/13,7	0,005457	
2	6/6	0,028437		10/13,5	0,006501	
	5/6	0,023540		9/13,5	0,008436	
	4/6	0,028437		8/13,5	0,009067	
	3/6	0,028437		7/13,5	0,009082	
	2,5	7/7,5		0,017600	5	15/15
6/7,5		0,017360		14/15		0,005485
5/7,5		0,022480	13/15	0,004365		
4/7,5		0,024050	12/15	0,004111		
3		9/9	0,014061	11/15		0,004995
		8/9	0,011494	10/15		0,006481
	7/9	0,011090	9/15	0,006871		
	6/9	0,014061	8/15	0,006693		
	5/9	0,014290	5,5	16/16,5	0,005326	
	4/9	0,013736		15/16,5	0,004411	
3,5	10/10,5	0,010006		14/16,5	0,002769	
	9/10,5	0,008825		13/16,5	0,003906	
	8/10,5	0,009645		12/16,5	0,004932	
	7/10,5	0,012525		11/16,5	0,006360	
	6/10,5	0,012525	10/16,5	0,006871		
	5/10,5	0,013345	9/16,5	0,006913		
4	12/12	0,008896	6	18/18	0,005162	
	11/12	0,007376		17/18	0,004463	
	10/12	0,006239		16/18	0,003489	
	9/12	0,006885		15/18	0,002929	
	8/12	0,008896		14/18	0,003106	
	7/12	0,009249		13/18	0,003998	
	6/12	0,008896		12/18	0,005162	
	5/12	0,008297		11/18	0,005553	

nebo přímo celková velikost reaktance

$$X_{\text{air}} = (\sigma_{\text{air1}} + \sigma_{\text{air2}}) \frac{F}{U_{\delta}} \cdot \frac{U_1}{I_u} \quad (123)$$

Reaktance diferenčního rozptylu se sčítá s ostatními rozptylovými reaktancemi ve výslednou reaktanci X , která spolu s činným odporem vinutí určuje výsledný úbytek napětí.

2.2.13. Kontrolní otázky

1. Jaké jsou základní vztahy platící pro střídavá vinutí?
2. Co je Görgešův diagram a jak se sestavuje?
3. Nakreslete průběh magnetomotorického napětí nejjednoduššího vinutí ($m = 3, q = 1$) a odvoďte z něho základní veličiny.
4. Jak kontrolujeme správnost zapojení střídavého vinutí?
5. Jak a proč zkracujeme krok dvouvrstvových vinutí?
6. Navrhněte dvouvrstvové vinutí se stejnými cívkami pro $m = 3, 2p = 8, q = 3$. Sestrojte jeho Görgešův diagram a vyznačte zapojení cívek.
7. Co jsou to zlomková vinutí a jaké jsou podmínky pro jejich zhotovitelnost?
8. Pomocí Tingleyova schématu navrhněte a vyhodnoťte jednovrstvové zlomkové vinutí pro $m = 3, 2p = 6, q = 5/3$.
9. Pomocí Tingleyova schématu navrhněte a vyhodnoťte dvouvrstvové zlomkové vinutí pro $m = 3, 2p = 6, q = 7/6$.
10. Čemu se rovná napětí indukované v jedné fázi střídavého vinutí točivým magnetickým polem?
11. Co je činitel vinutí a jak se definuje?
12. Jak určujeme činitel vinutí grafickým způsobem?
13. Jak určujeme činitel vinutí z Tingleyova schématu?
14. Jak určujeme činitel vinutí matematickou metodou? Jak se definuje činitel rozlohy a činitel kroku?
15. Jak vypočítáme činitel rozlohy?
16. Jak vypočítáme činitel kroku?
17. Co je činitel tvaru?
18. Jak se chová klecové vinutí v točivém magnetickém poli?
19. Co rozumíme harmonickou analýzou?
20. Čemu se rovná amplituda první harmonické a n té harmonické pro obdélníkový průběh funkce?
21. Jaký je vliv vyšších harmonických v křivce průběhu magnetického toku na chod motoru?
22. Co rozumíme diferenčním rozptylem?
23. Jak vypočítáme reaktanci způsobenou tzv. diferenčním rozptylem?
24. Co je činitel diferenčního rozptylu, na čem závisí a jak ho určujeme?

3. POSTUPY PŘI NÁVRHU TOČIVÝCH ELEKTRICKÝCH STROJŮ

3.1. NÁVRH INDUKČNÍHO MOTORU

3.1.1. Základní údaje

Pro návrh indukčního motoru jsou potřebné tyto údaje:

požadovaný výkon motoru P [kW],
sdružené napětí sítě U [V] a jeho kmitočet f [Hz],
počet fází,
synchronní otáčky nebo počet pólů,
zapojení statorového vinutí (podle způsobu připojení motoru k síti),
druh rotoru (nakrátko, kroužkový),
tvar motoru, jeho krytí a způsob chlazení,
druh zatížení,
prostředí, teplota okolí.

3.1.2. Určení hlavních rozměrů motoru nakrátko

1. Vnitřní výkon je dán vztahem

$$P_1 = \frac{P}{\eta \cos \varphi} \quad (124)$$

a jím jsou určeny hlavní rozměry stroje.

Účinnost a účinník musíme odhadnout, např. porovnáním s údaji o našich motorech různého provedení, uvedenými v tab. 10 a 11.

2. Fázové napětí statorového vinutí je dáno zapojením vinutí.

Pro zapojení do hvězdy (Y)

$$U_1 = \frac{U}{\sqrt{3}}$$

Tabulka 10. Průměrné účinnosti

Výkon kW	Počet							
	2				4			
	Nakrátko		Kroužkový		Nakrátko		Kroužkový	
	o	z	o	z	o	z	o	z
0,25 0,50 0,65 0,80		0,68				0,68		
	0,73 0,80			0,75 0,75	0,74			
1,0 1,1 1,5 2,2 2,7 3,0 4,0 5,5 7,0 7,5 9,0	0,78 0,74 0,80 0,81 0,84 0,82 0,82 0,84 0,84 0,84 0,84	0,79 0,80 0,81 0,83 0,83 0,83 0,84 0,84 0,86 0,84			0,80 0,78 0,80 0,83 0,85 0,85 0,85 0,88 0,88	0,78 0,79 0,80 0,82 0,83 0,84 0,84 0,86 0,86		
10 14 15 20 30 42 50 53 55 56 60 68 72 80 90	0,86 0,87 0,88	0,87 0,88	0,84 0,855	0,84 0,87	0,87 0,88	0,88 0,90	0,83 0,85	0,85 0,87
			0,89	0,89			0,895	0,905
		0,89	0,89	0,92			0,90	0,91
					0,905			0,92
			0,89				0,905	0,92
	0,91			0,925			0,905	
100 110 200 320	0,90 0,90		0,90 0,93 0,94	0,925 0,94	0,905 0,93		0,905 0,93 0,94	0,93 0,935

o — otevřený motor, z — zavřený motor

indukčních motorů

pólů	Počet							
	6				8			
	Nakrátko		Kroužkový		Nakrátko		Kroužkový	
	o	z	o	z	o	z	o	z
0,70				0,65 0,70	0,65 0,73			
0,78 0,79 0,81 0,84	0,77 0,79 0,81			0,77	0,74 0,74 0,78 0,79			
0,86 0,86	0,83 0,84 0,85 0,87 0,83	0,82	0,85	0,86 0,85	0,79 0,80 0,83	0,82	0,85	0,82 0,85
0,87	0,89	0,85	0,87					0,86 0,87 0,88
		0,885 0,89 0,90	0,87	0,87	0,88			0,88 0,90
		0,90	0,92					0,985 0,92
0,905			0,89					0,93
		0,905	0,89					0,93
0,905		0,91	0,93					0,905 0,93
0,905		0,915	0,93	0,91				0,91 0,92 0,93
0,925		0,93 0,93	0,94					0,94 0,94

Pro zapojení do trojúhelníku (D)

$$U_1 = U$$

3. Statorový proud vypočteme z vnitřního výkonu

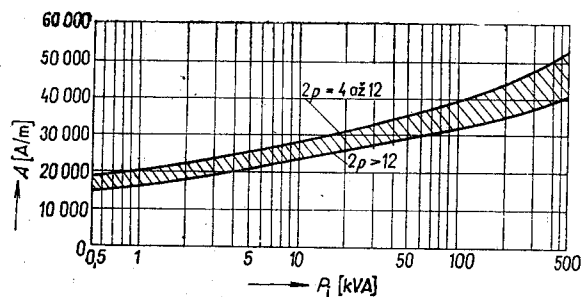
$$I_1 = \frac{P_1 \cdot 10^3}{3U_1} \quad [\text{A}; \text{kVA}, \text{V}] \quad (125)$$

4. Průměr vrtání statoru odhadujeme porovnáním známých konstrukcí. Podle [2] je možné pro běžné typy motorů vyjádřit průměr v závislosti na vnitřním výkonu vztahem

$$d = (5 + 1,5p) P_1^{0,29} \cdot 10^{-2} \quad [\text{m}; \text{kVA}] \quad (126)$$

Při sériové výrobě je třeba tento průměr upravit tak, aby z daných plechových tabulí nebo svitků byl co nejmenší odpad.

5. Obvodovou proudovou hustotu A představující část celkové vrstvy statorového proudu, připadající na jednotku obvodu vrtání statoru, můžeme určit z obr. 66. Horní křivka platí pro $2p = 4$ až 12, spodní pro $2p = 2$ a $2p > 12$.



Obr. 66. Obvodová proudová hustota statoru indukčních motorů

6. Počet závitů v sérii pro jednu fázi vychází ze vztahu

$$\pi d A = 2N_{s1} m I_1$$

neboť na obvodu je $2N_{s1}m$ vodičů, kterými prochází proud I_1 . Pro obvyklý počet fází $m = 3$ je

$$N_{s1} = \frac{\pi d A}{6 I_1} \quad (127)$$

7. Počet drážek na pól a fázi statorového vinutí volíme podle výkonu a podle počtu pólů pomocí tab. 12.

Tabulka 12. Počet drážek na pól a fázi

Pro počet pólů $2p$	do 1,1 kW	do 7,5 kW	do 80 kW
2	3	4	5
4	2	3	4
6		2	3
12		2	3

Velké dvoupólové stroje mají q až 9
Dvoupólové natáčivé transformátory mají q až 14

8. Vinutí a jeho parametry se navrhuje podle čl. 2.2. Počet statorových drážek

$$Q_1 = q_1 2pm \quad (128)$$

Plný krok je roven pólové rozteči

$$t_p = \frac{Q_1}{2p} \quad [\text{drážek}] \quad (129)$$

a ten se zkrátí na 4/5, takže

$$y_1 = (4/5) t_p \quad (130)$$

9. Počet vodičů v drážce

$$V_{d1} = \frac{2N_{s1} 2a}{2pq_1} = \frac{N_{s1} 2a}{pq_1} \quad (131)$$

kde $2a$ je počet paralelních větví.

Vypočtený počet vodičů v drážce musíme zaokrouhlit na celé a u dvouvrstvého vinutí na sudé číslo. Pro větší proudy jsou vodiče z profilu a počet vodičů v drážce je třeba upravit tak, aby se vodiče do dané drážky vešly.

Ze zaokrouhleného počtu vodičů v drážce pak zpětně opravíme i počet závitů N_{s1} . Opravený počet vodičů v sérii je

$$N_{s1} = pqV_{d1} \quad (132)$$

Počet vodičů v drážce určuje počet závitů jedné cívky:

u jednovrstvého vinutí

$$N_{c1} = V_{d1} \quad (133a)$$

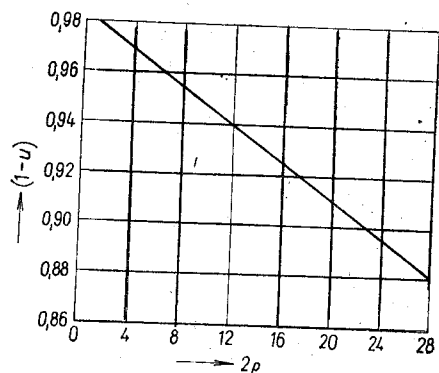
u dvouvrstvého vinutí

$$N_{c1} = \frac{V_{d1}}{2} \quad (133b)$$

10. Magnetický tok jednoho pólu vypočteme z rovnice (98), jestliže se indukované napětí nahradí fázovým napětím a předpokládaným úbytkem u v procentech

$$\Phi = \frac{(1-u) U_1}{\pi \sqrt{2} f N_{s1} k_{v1}} \quad (134)$$

Velikost úbytku napětí závisí na počtu pólů a výraz $(1-u)$ můžeme zjistit z diagramu na obr. 67.



Obr. 67. Činitel úbytku napětí indukčních motorů

Činitel vinutí určíme z rovnic (100), (102) nebo jiným způsobem podle článku 2.2.7 a je

$$k_{v1} = k_{vr1} k_{vy1} \quad (135)$$

11. Efektivní délku železa l_e určíme ze vztahu pro magnetický tok

$$\Phi = k_t B_{\delta t_p} l_e$$

$$l_e = \frac{\Phi}{k_t B_{\delta t_p}} \quad [\text{m}; \text{Wb}, \text{T}, \text{m}] \quad (136)$$

kde B_{δ} je amplituda skutečného (deformovaného) průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře (čl. 2.2.8),

k_t činitel tvaru (plnění pólové křivky), součin $k_t B_{\delta}$ představuje střední hodnotu magnetické indukce pod jedním pólem,

t_p pólová rozteč.

Pólová rozteč je

$$t_p = \frac{\pi d}{2p} \quad (137)$$

Magnetickou indukcí B_{δ} lze pro zhotovené stroje udát podle [2] rovnicí

$$B_{\delta} = 0,55 P_i^{0,55} \quad [\text{T}; \text{kVA}] \quad (138)$$

a podobně činitel tvaru

$$k_t = \frac{0,75}{P_i^{0,012}} \quad (139)$$

12. Celková délka železa je větší o ventilační kanály

$$l = l_e + n_{vk} l'_{vk} \quad (140)$$

kde n_{vk} je počet ventilačních kanálů,

l'_{vk} délka jednoho ventilačního kanálu (obvykle 10 mm).

Asi do délky 150 mm může být železo bez kanálů.

13. Vodiče statorového vinutí se dimenzují tak, aby ztráty způsobené činným odporem vinutí (Jouleovy ztráty) nepřekročily obvyklou velikost. Podle [2] bývají ztráty ve statorovém vinutí

$$\Delta P_{j1} = 75 P_i^{0,75} \quad [\text{W}; \text{kVA}] \quad (141)$$

u dvupólových strojů (dlouhá čela) asi o 20 % menší, u volnoběžných strojů asi o 20 % větší.

Těmto ztrátám odpovídá (pro trojfázové vinutí) odpor jedné fáze

$$R_1 = \frac{\Delta P_{j1}}{3 I_1^2} \quad (142)$$

14. Průřez statorového vinutí, zanedbáme-li činitele dodatečných ztrát (viz první díl učebnice), určíme z odporu R_1

$$S_1 = \frac{2q(l + l_{\epsilon 1}) N_{s1}}{2a R_1} \quad [\text{m}^2; \Omega \text{m}, \text{m}, \Omega] \quad (143)$$

kde l je délka železa,

$l_{\epsilon 1}$ délka čela,

$2a$ počet případných paralelních větví.

Není-li stroj navržen, můžeme délku čela odhadnout. Podle Richtra je pro motory do napětí 500 V délka čela

$$l_{\epsilon 1} = 2y + 0,01 \quad [\text{m}; \text{m}] \quad (144)$$

pro motory na vysoké napětí

$$l_{e1} = 2y + 0,04U \quad [\text{m}; \text{m}, \text{kV}] \quad (145)$$

kde U je sdružené napětí,
 y výsledný krok je dán vztahem

$$y = \frac{y_d}{t_p} \cdot t_p \quad [\text{m}; -, \text{m}]$$

přičemž zlomek y_d/t_p udává zkrácení kroku (např. 4/5, 7/9 apod.).
Moderní stroje mají délku čela menší, než udává Richtrův vzorec.

Poznámka. Podle ČSN 35 0015 se udává účinnost stroje pro teplotu vinutí 75 °C (izolace A, B, E) nebo 115 °C, jestliže jde o izolaci F nebo H. Proto musíme uvažovat odpor vinutí též při této teplotě.

Podle ČSN 42 3001 má měď při teplotě 20 °C měrný odpor

$$\rho_{\text{Cu}} = \frac{1}{56} \cdot 10^{-6} \Omega \text{m}$$

a na jinou teplotu se přepočítá pomocí vztahu, který uvádí ČSN 35 0015

$$R_2 = R_1 \frac{235 + \vartheta_2}{235 + \vartheta_1}$$

takže bude

$$\rho_{\text{Cu}75} = \frac{1}{56} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{235 + 75}{235 + 20} = \frac{1}{46} \cdot 10^{-6} \Omega \text{m}$$

Podobně pro hliník je podle ČSN 42 4004

$$\rho_{\text{Al}20} = \frac{1}{34} \cdot 10^{-6} \Omega \text{m}$$

a na teplotu 75 °C se přepočítá stejně jako měď

$$\rho_{\text{Al}75} = \frac{1}{28} \cdot 10^{-6} \Omega \text{m}$$

S těmito velikostmi měrných odporů je třeba při konstrukci a výpočtu elektrických strojů počítat, i když v literatuře se někdy uvádějí odlišné údaje.

15. Rozměry vodiče (průměr, šířka \times tloušťka) určíme z vypočteného průřezu S_1 a upravíme podle tabulek vyráběných vodičů (tab. 2, 3, 4a, 4b), ze kterých se pro zvolenou izolaci určí i izolační přírůstky.

Kruhové vodiče se volí do průměru 2,8 mm. U větších průřezů se volí několik kruhových vodičů paralelně vinutých. Jestliže ani to nestačí, je nutné na zhrnout vinutí s paralelními větvemi a v případě potřeby se každá větev může ještě navíjet z několika paralelních vodičů. O tom rozhodují výrobní možnosti a rozměry skladovaných materiálů.

Větší stroje mají čtyřhranné vodiče, které umožňují lepší využití drážky a lepší chlazení. Rozměry dynamových pásů je třeba určit zkusmo tak, aby

se tyto pásy daly ukládat do plných vrstev a aby drážka byla dobře vyplněna. Aby se toho dalo dosáhnout, musíme obvykle vhodně změnit počet vodičů v drážce V_d a tím i počet závitů N_s .

Pozor!

Jestliže navrhujeme vinutí s několika paralelními vodiči vinutými současně, nevznikají ještě paralelní větve a potom $2a = 1$. Jen tehdy, jestliže se paralelně zapojují cívky nebo jejich skupiny, je $2a > 1$.

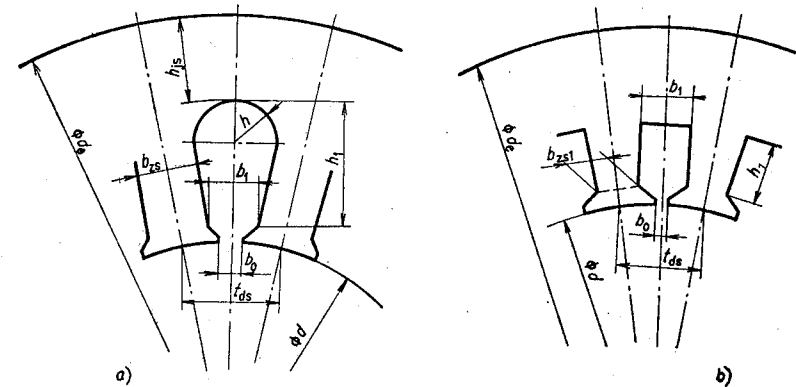
Zvolenému vodiči odpovídá skutečný průřez S_1 (zjištěný z tabulek) a s tím pak dále počítáme.

Skutečnému průřezu odpovídá proudová hustota

$$\sigma = \frac{I_1}{2a S_1} \quad [\text{A}/\text{m}^2; \text{A}, \text{m}^2] \quad (146)$$

16. Hlavní rozměry drážky vycházejí z drážkové rozteče, měřené ve vzduchové mezeře (obr. 68)

$$t_{ds} = \frac{t_p}{q_1 m} = \frac{\pi d}{Q_1} \quad (147)$$



Obr. 68. Rozměry statorových drážek:
a) lichoběžníková drážka, b) drážka s rovnoběžnými stěnami

Šířka zubu b_{zs} v nejužším místě (obr. 68) se určí z rovnice pro magnetickou indukci v zubu

$$B_z = B_\delta \frac{t_d}{b_z k_{Fe}}$$

a je

$$b_{zs} = t_{ds} \frac{B_{\delta}}{B_{zs} k_{Fe}} \quad (148)$$

kde index s udává, že jde o rozměry týkající se statoru.

Magnetická indukce v nejužším místě zubu se volí $B_{zs} = (1,6 \text{ až } 2,2) \text{ T}$. Činitel plnění je dán kvalitou plechů a způsobem jejich izolace (např. podle tab. 1). Obvykle uvažujeme:

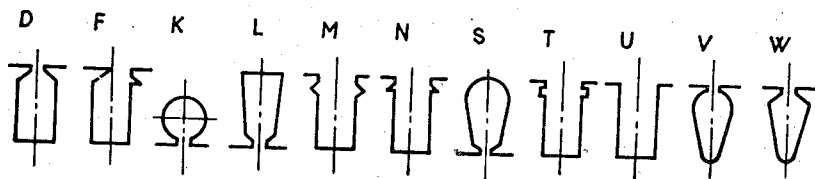
$k_{Fe} = 0,90$ pro plechy izolované hedvábným papírem

$k_{Fe} = 0,93$ pro plechy stříkané lakem

$k_{Fe} = 0,98 \text{ až } 0,99$ pro plechy fosfátované.

Po návrhu drážky se šířka zubu definitivně upraví.

17a. Tvary a rozměry drážek předepisuje oborová norma ON 35 0868, která platí pro stroje nad 500 kW. Na obr. 69 je přehled normalizovaných tvarů drážek a jejich označení. Na obr. 70 jsou kóty předepsaných rozměrů nejčastějších drážek.



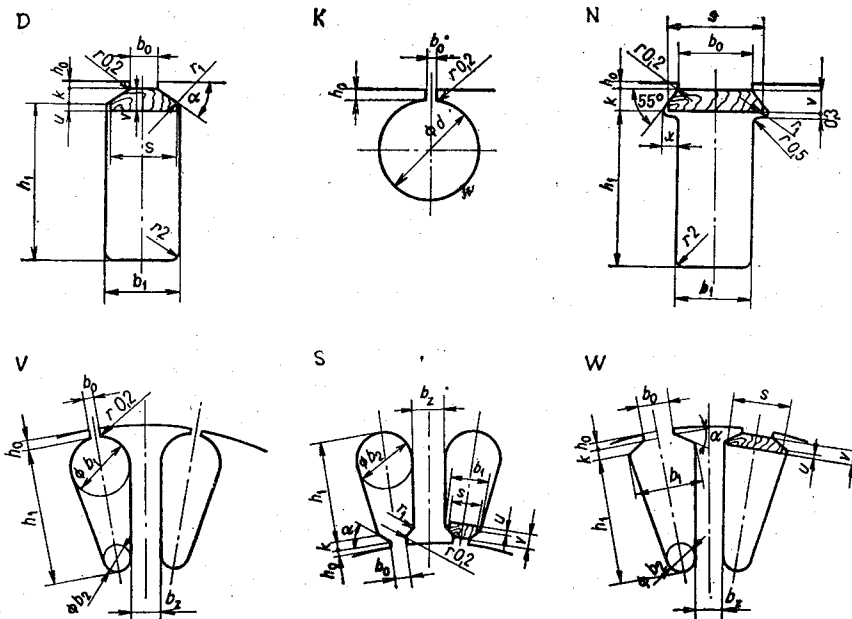
Obr. 69. Normální tvary drážek (ON 35 0868)

Pro kruhové vodiče obvykle používáme *polouzavřené drážky s půlkruhovým dnem* nebo *drážky L s rovným dnem*, u nichž vychází zub s rovnoběžnými boky a stálou magnetickou indukcí po celé délce (dobré využití železa). Pro profilované dynamové pásy je nutno použít *polouzavřenou drážku D* nebo *F*, s rovnoběžnými boky, nebo *lichoběžníkovými zuby*. Pro šablonová vinutí vn se používají *otevřené drážky N a M*.

Drážky *K a V* jsou určeny pro *rotorové klece*, drážka *W* pro *rotory malých kroužkových motorů*, vinuté kruhovým vodičem.

Velmi malé motorky mohou mít *lichoběžníkové drážky* tvaru *S*, ale s *půlkruhovým uzávěrem*, které se uzavírají jen páskem z lesklé lepenky.

Před návrhem drážky musíme zvolit drážkovou izolaci a izolaci mezivrstvou (mezi dvěma cívkovými stranami v jedné drážce).



Obr. 70. Rozměry nejběžnějších drážek podle ON 35 0868

Drážková izolace má tři vrstvy:

Třída A

lepenka — lakovaná tkanina — lepenka, celkem 0,42 až 0,6 mm,
lepenka — triacetátová fólie — lepenka, celkem 0,35 až 0,45 mm,
kombinovaná izolace: lakovaná tkanina nebo fólie pevně spojená s lepenkou.

Třída B

lepenka — impregnovaná skelná izolace,
tkanina — lepenka.

Rozměry izolace můžeme přesně určit podle příslušných norem.

Mezivrstvou izolace se dělá obvykle z lepenkové vložky tloušťky 0,5 až 1,0 mm.

Všeobecná zásada

Hloubku drážky určíme tak, aby do jejího prostoru, zmenšeného o drážkovou izolaci, mezipolohovou izolaci a uzavírací klín, se vešel při-

slušný počet vodičů i s potřebnou vůlí, tzn. 0,05 mm až 0,2 mm na každý vodič (čím tlustší vodič, tím větší vůle).

17b. U lichoběžníkových drážek se z rozměrů t_{ds} a b_{zs} nakreslí ve značně zvětšeném měřítku dva sousední boky zubů i s příslušným drážkovým uzávěrem tak, aby rozměr b_1 vyhovoval normě ON 35 0868.

Abychom dosáhli normalizované šířky drážky, musíme obvykle změnit šířku zubu.

Na stěny drážky a pod klín nakreslíme zvolenou drážkovou izolaci a do ostatního prostoru zakreslíme jeden vodič vedle druhého tak, jak asi budou po navinutí ležet v drážce. Průměr vodiče přitom zvětšíme o průměrnou vůli.

Mezi obě polohy zakreslíme mezipolohovou izolaci.

Zakreslením všech vodičů získáme hloubku drážky h_1 .

Pro předběžný výpočet je možné potřebný průřez drážky určit pomocí činitele plnění drážky, kterým se rozumí poměr aktivního průřezu všech vodičů v drážce k čisté ploše drážky. U kruhových vodičů to bývá 0,65.

Činitele plnění drážky můžeme použít i při kontrole drážky, při opravě nebo při převinování strojů.

17c. U obdélníkové drážky se dá určit hned její šířka

$$b_{1s} = t_{ds} - b_{zs}$$

kterou opět upravíme na normalizovaný rozměr, ale tak, aby se do ní při použití plochých vodičů dalo uložit na šířku tolik vodičů (s izolaci a vůli), aby počet vodičů V_{d1} dělený tímto počtem dal celé číslo (počet vrstev nad sebou). Přitom je potřebné určit napřed zkusmo vhodnou šířku vodiče a z průřezu pomocí tabulek vyráběných rozměrů stanovit příslušnou výšku.

Abychom dosáhli souměrného a dokonalého vyplnění drážky plochými vodiči, je třeba často zkusmo měnit i počet vodičů v drážce. Tím se mění i počet závitů zapojených do série a následkem toho i veličiny Φ , B_δ a B_z .

Tyto veličiny je nutno vždy zpětně přepočítat a v dalším výpočtu z nich vycházet.

Z ON 35 0868 určíme všechny charakteristické rozměry a celá drážka se podle nich nakreslí a okótuje.

Má-li drážka válcové dno, určí se průměr jeho zaoblení ze vztahů uvedených v normě nebo jednoduchým odměřením v náčrtku.

Označení drážky v technických podkladech má tyto údaje:

tvar drážky

velikost — daná součinem $b_1 \times h_1$

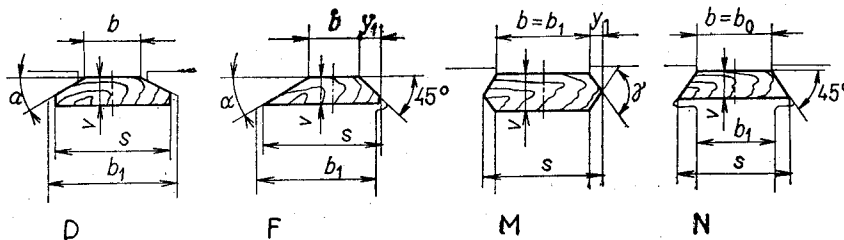
počet drážek na stroji Q

číslo normy ON 35 0868

Příklad

Drážka M $\times 16$ 48 ON 35 0868

18. Drážkový klín. Určením normalizované šířky drážky b_1 je zároveň určen i rozměr drážkového klínu $s \times v$. Rozměry klínu jsou uvedeny v normě ON 35 0935 a jejich tvary na obr. 71. Písmenové značení souhlasí s označením drážky.



Obr. 71. Rozměry drážkových klínů podle ON 35 0935

Označení klínu má tyto údaje:

tvar klínu

velikost — daná součinem šířka \times délka ($s \times l$)

materiál

číslo normy ON 35 0935

Příklad

Klín F 11,5 \times 200 ON 35 0935 — bukové dřevo

V rámci kontroly návrhu kontrolujeme u daného klínu namáhání v ohybu podle čl. 1.5.4.

19. Jeho statoru volíme tak vysoké, aby magnetická indukce v něm byla

$$B_{js} = (1,4 \text{ až } 1,8) \text{ T}$$

Jeho výška je potom

$$h_{js} = \frac{\Phi}{2k_{Fe}B_{js}l_e} \quad (150)$$

přičemž za magnetický tok Φ je třeba dosadit skutečnou (upravenou) hodnotu.

Vnější průměr statorových plechů je

$$d_e = d + 2h_{js} + 2(h_0 + k + h_1) \quad (151)$$

kde h_0 , k , h_1 jsou rozměry statorové drážky (viz obr. 70).

Vypočtený výsledek zaokrouhlíme na průměr používaný v závodě nebo na průměr, dávající nejmenší odpad při prostřihování.

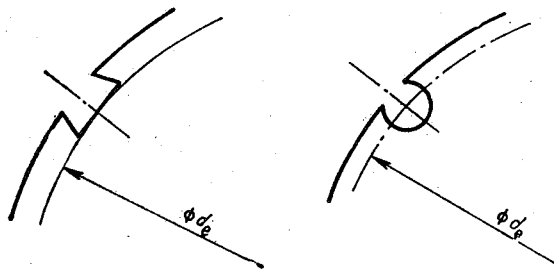
Zaokrouhlenému průměru d_e odpovídá nová skutečná výška h_a

$$h_{1s} = \frac{d_e - d - 2(h_0 + k + h_1)}{2} \quad (152)$$

ze které se určí skutečná magnetická indukce

$$B_{1s} = \frac{\Phi}{2h_{1s}l_c k_{Fe}} \quad (153)$$

Poznámka. Jestliže jde o větší stroj, potom k vnějšímu průměru d_e podle (151) musíme připočítat výšku výřezu pro závěsné klínové pravítko nebo poloviční průměr otvorů kruhových pravítek, případně poloviční průměr stahovacích šroubů (obr. 72).



Obr. 72. Určení vnějšího průměru větších strojů

20. Vzduchovou mezeru určujeme empirickými vzorci, např. podle Sumce

$$\delta = C \sqrt[3]{\frac{d^2 l f}{2p \cdot 50}} \quad [\text{mm}; \text{m}, \text{m}, \text{Hz}] \quad (154)$$

a zaokrouhlujeme ji na 0,05 mm.

Konstanta $C = 4$, pro $2p \geq 4$,
 $C = 5$, pro $2p = 2$,
 $C = 6$, pro jeřábové motory.

Pro větší průměry nemá být z výrobních důvodů

$$\delta < \frac{d}{1000}$$

I u nejmenších motorků nevolíme vzduchovou mezeru menší než 0,2 mm.

21. Průměr rotoru je

$$d_r = d - 2\delta \quad (155)$$

22. Počet tyčí klece má vzhledem k momentům vyšších harmonických a k co nejmenšímu hluku vyhovovat vztahům

$$2p = 2 \quad Q_2 = Q_1 \pm 11 \quad (156)$$

$$2p = 4 \quad Q_2 = Q_1 \pm 4p \quad (157)$$

$$2p = 6 \quad Q_2 = Q_1 \pm 4p \quad \text{nebo} \quad Q_1 \pm 3p \quad (158)$$

$$2p = 8 \quad \text{a více} \quad Q_2 = Q_1 \pm 4p \quad \text{nebo} \quad Q_1 \pm p \quad (159)$$

Heller doporučuje tyto počty drážek

$$2p = 2 \quad Q_1 = 18 \quad Q_2 = 14; 22 \quad (\text{zešikmit})$$

24
30

$$2p = 4 \quad Q_1 = 24 \quad Q_2 = 18; 30 \quad (\text{zešikmit})$$

36
48

$$2p = 6 \quad Q_1 = 36 \quad Q_2 = 26; 46$$

54
40; 44; 64; 66; 68; 70

$$2p = 8 \quad Q_1 = 48 \quad Q_2 = 34; 62$$

72
54; 58; 86; 88; 90

Výrobní závody mají k dispozici přesné směrnice pro volbu počtu drážek a jejich zešikmení podle různých kritérií.

23. Proud v rotorové tyči je podle čl. 3.10 (I. díl)

$$I_T = \kappa I_1 \frac{2m_1 N_{s1} k_{v1}}{Q_2} \quad (160)$$

kde κ je činitel vazby a bývá

$$\kappa = \kappa_1 \kappa_2 = (0,94 \text{ až } 0,98)^2 \quad (161)$$

24. Proud v kruhu klece je dán vztahem

$$I_K = I_T \frac{Q_2}{2\pi p} \quad (162)$$

25. Průřezy tyčí a kruhů můžeme určit ze zvolené proudové hustoty, která bývá

$$\sigma_2 = (6 \text{ až } 8) \cdot 10^6 \text{ A/m}^2 \quad \text{pro Cu}$$

$$\sigma_2 = (4 \text{ až } 5) \cdot 10^6 \text{ A/m}^2 \quad \text{pro Al}$$

$$S_T = \frac{I_T}{\sigma_2} \quad (163)$$

$$S_K = \frac{I_K}{\sigma_2} \quad (164)$$

Je-li, s ohledem na známý charakter zátěže motoru, předem předepsán záběrný moment, potom můžeme průřezy volit tak, aby klec měla takový odpor, kterému bude požadovaný záběrný moment nebo požadovaný poměr M_z/M_n právě odpovídat.

Platí (viz I. díl)

$$\frac{M_z}{M_n} = \frac{m_1 R_{21} I_{1k}^2}{P \cdot 10^3} \quad (165)$$

z toho vypočteme potřebný rotorový odpor, přepočtený na stator

$$R_{21} = \frac{M_z}{M_n} \cdot \frac{P \cdot 10^3}{m_1 I_{1k}^2} \quad (166)$$

Statorový záběrný proud odhadneme

$$I_{1k} = (4 \text{ až } 7) I_1 \quad (167)$$

Skutečná velikost odporu klece je

$$R_2 = R_{21} \frac{Q_2}{4 p m_1 N_{s1}^2 k_{\tau 1}^2} \quad (168)$$

Poznámka. Tak jako u transformátoru vychází i u indukčního motoru

$$R_{21} \doteq R_1$$

Odpor klece závisí na odporu tyčí a kruhů a je dán vztahem

$$R_2 = \frac{1}{p} \left(R_T + 2R_K \frac{Q_2}{(2\pi p)^2} \right) \quad (169)$$

přičemž

$$R_T = \rho \frac{l_T}{S_T} \quad \text{a} \quad R_K = \rho \frac{\pi d_K}{S_K}$$

kde l_T je délka tyče (obvykle $l_T = l$)

d_K střední průměr kruhu,

S_T, S_K průřezy tyče a kruhu.

Po dosazení dostaneme

$$R_2 = \frac{\rho}{p} \left(\frac{l_T}{S_T} + \frac{2\pi d_K}{S_K} \cdot \frac{Q_2}{(2\pi p)^2} \right) \quad (170)$$

Při stejné proudové hustotě v tyči i v kruhu jsou průřezy přímo úměrné proudům

$$\frac{S_K}{S_T} = \frac{I_K}{I_T} \quad (171)$$

z čehož plyne

$$S_K = S_T \frac{I_K}{I_T} = S_T \frac{I_T \frac{Q_2}{2\pi p}}{I_T} = S_T \frac{Q_2}{2\pi p}$$

Po dosazení do (170) je

$$R_2 = \frac{\rho}{p} \left(\frac{l_T}{S_T} + \frac{2\pi d_K 2\pi p}{S_T Q_2} \cdot \frac{Q_2}{(2\pi p)^2} \right)$$

$$R_2 = \frac{\rho}{p S_T} \left(l_T + \frac{d_K}{p} \right)$$

a z toho průřez tyče při známém odporu R_2 bude

$$S_T = \frac{\rho}{R_2 p} \left(l_T + \frac{d_K}{p} \right) \quad (172)$$

Průměr kruhu d_K ještě neznáme, můžeme jej však odhadnout. Bývá o 20 až 40 mm menší než vrtání statoru d .

Odpovídající průřez kruhu můžeme potom určit z úměry

$$S_K = S_T \frac{I_K}{I_T} \quad (173)$$

Z vypočteného průřezu kruhu se určí jeho profil a zkontroluje se skutečný průměr kruhu d_K .

26. Rotorovou drážku volíme podle druhu klece. Měděné klece mají kruhové tyče v drážce K, jen malé motorčky mají někdy ploché měděné tyče v obdélníkových drážkách. Klece ze stříkaného hliníku mají drážky tvaru V.

Rozměry drážky musíme zvolit tak, aby měla průřez S_T a aby magnetická indukce v zubu nepřekročila dovolenou mez.

U drážky V mají zuby rovnoběžné boky a jejich magnetická indukce je stejná jako ve statorových zubech. Ale pozor! Zuby rotoru prochází magnetický tok zmenšený o statorový rozptyl, tedy tok

$$\Phi_{zr} = \kappa_1 \Phi \quad (174)$$

Při stejné magnetické indukci ve statorových a rotorových zubech můžeme šířku rotorového zubu určit z úměry

$$b_{zr} = \kappa_1 b_{zs} \frac{Q_1}{Q_2} \quad (175)$$

Činitel vazby byl odhadnut podle (161).

U kruhových drážek je šířka zubu dána průměrem rotorové tyče. Tento průměr závisí na velikosti proudu v tyči. Proto musíme počet rotorových drážek určit tak, aby byly splněny podmínky vhodné proudové hustoty v tyči a vhodné magnetické indukce v zubu.

Rotorovou drážku opět nakreslíme ve zvětšeném měřítku a navrhujeme zkusmo tak dlouho, až při daném průřezu S_T a šířce b_{zr} má normalizované rozměry, uvedené v ON 35 0868.

Rotorové drážky kreslíme s roztečí

$$t_{dr} = \frac{\pi d_r}{Q_2} \quad (176)$$

Nakreslenou drážku okótujeme podle obr. 70 s použitím tabulek uvedených v ON 35 0868, podobně jako drážku statorovou.

Po úpravě rozměrů rotorové drážky vypočítáme její skutečný průřez S_T pomocí běžných geometrických vztahů. Tento průřez budeme potřebovat pro výpočet ztrát.

Skutečnou šířku zubu můžeme určit z rozteče na průměru

$$d_b = d_r - 2h_0 - 2 \frac{b_1}{2} \quad (177)$$

a je

$$b_{zr} = t_{dr} \frac{d_b}{d_r} - b_1 \quad (178)$$

Této šířce odpovídá skutečná magnetická indukce v zubu rotoru

$$B_{zr} = B_{zs} \frac{b_{zr} - [\text{původní (175)}]}{b_{zr} - [\text{skutečná (178)}]} \quad (179)$$

Tuto magnetickou indukci použijeme při výpočtu magnetomotorického napětí.

Zešikmení rotorových drážek volíme obvykle stejně velké jako rozteč statorových drážek nebo podle podnikových směrnic.

27. Průměr hřídele pod rotorovými plechy. Podle čl. 1.5.1. se vychází z rozměrů volného konce hřídele podle ČSN 35 0040, tab. 7. Průměr hřídele v zadním ložisku bývá o stupeň větší a stejně o stupeň větší bývá i průměr za ložiskem.

Potřebu dalšího odstupňování určíme z prvního návrhu konstrukčního uspořádání. U menších motorů je průměr hřídele v celé délce stejný, u větších motorů se podle potřeby i několikrát odstupňuje.

Takto zjištěný předběžný průměr hřídele pod plechy d_h ovlivňuje výšku rotorového jha.

28. Jho rotoru se dimenzuje na magnetický tok zmenšený o statorový i rotorový rozptyl

$$\Phi_{jr} = \kappa_1 \kappa_2 \Phi = \kappa \Phi \quad (180)$$

Jeho výšku určíme tak, aby magnetická indukce v něm byla asi

$$B_{jr} = 1,6 \text{ T}$$

takže

$$h_{jr} = \frac{\kappa \Phi}{2 B_{jr} l_e k_{Fe}} \quad (181)$$

Největší možný vnitřní průměr rotorových plechů potom bude

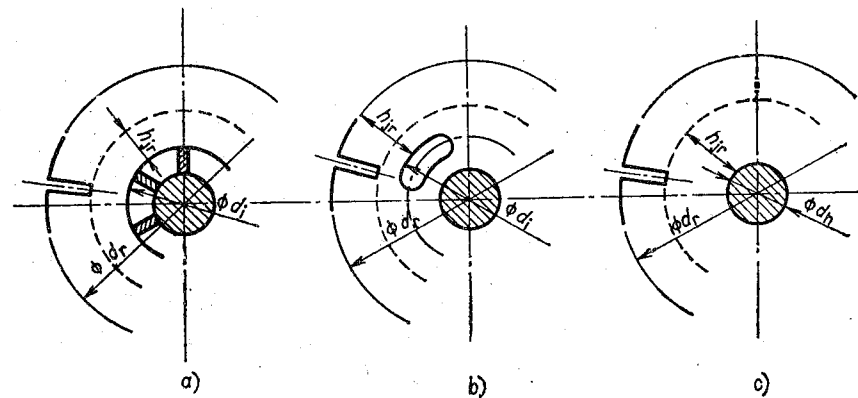
$$d_i = d_r - 2(h_{jr} + h_1 + h_0) \quad (182)$$

Na tento průměr se upraví průměr rotorové hvězdy, na kterou se nasadí rotorové plechy (obr. 73a), nebo se na tento průměr upraví vnější obvod chladičích otvorů v rotorovém svazku podle obr. 73b.

Je-li průměr rotoru malý, nasadí se plechy přímo na hřídel (obr. 73c), takže výška rotorového jha je dána průměrem hřídele d_h

$$h_{jr} = \frac{d_r - 2(h_1 + h_0) - d_h}{2} \quad (183)$$

a magnetickou indukci B_{jr} musíme potom kontrolovat zpětným výpočtem z rovnice (181).



Obr. 73. Určení vnitřního průměru rotorových plechů a výšky rotorového jha

3.1.3. Kontrola návrhu

3.1.3.1. Magnetizační proud

Magnetizační proud určíme z celkového magnetomotorického napětí pro jednu pólovou dvojici.

a) Části magnetického obvodu. Střední indukční čára prochází těmito úseky magnetického obvodu:

2 × vzduchovou mezerou,

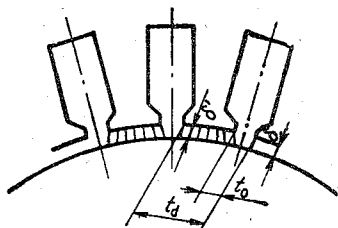
2 × zuby rotoru,

2 × zuby statoru,

jhem statoru,

jhem rotoru.

Celkové magnetomotorické napětí určíme tak, že sečteme magnetická napětí potřebná k protlačení magnetického toku jednotlivými částmi magnetického obvodu.



Obr. 74. Carterův činitel

b) Magnetické napětí je pro jeden přechod vzduchovou mezerou dáno známým vztahem

$$U_{\delta} = 0,8B_{\delta}\delta \cdot 10^6 \quad (184)$$

kde B_{δ} je amplituda magnetické indukce ve vzduchové mezeře,

δ délka vzduchové mezery.

V točivých elektrických strojích se vlivem drážkování železa indukční čára prodlužuje podle obr. 74 na délku δ' .

Toto prodloužení vyjadřujeme Carterovým činitelem k_C .

$$\delta' = k_C\delta \quad (185)$$

Velikost Carterova činitele je dána různými vztahy podle různých

autorů. Vhodný je vztah udávaný Liwshitzem

$$k_C = \frac{t_d}{t_d - \frac{b_0^2}{b_0 + 5\delta}} \quad (186)$$

Pro drážkovaný stator a rotor určíme Carterův činitel k_C zvlášť pro stator (k_{Cs}) a zvlášť pro rotor (k_{Cr}). Výsledný Carterův činitel pak dostaneme ze vztahu

$$k_C = k_{Cs}k_{Cr} \quad (187)$$

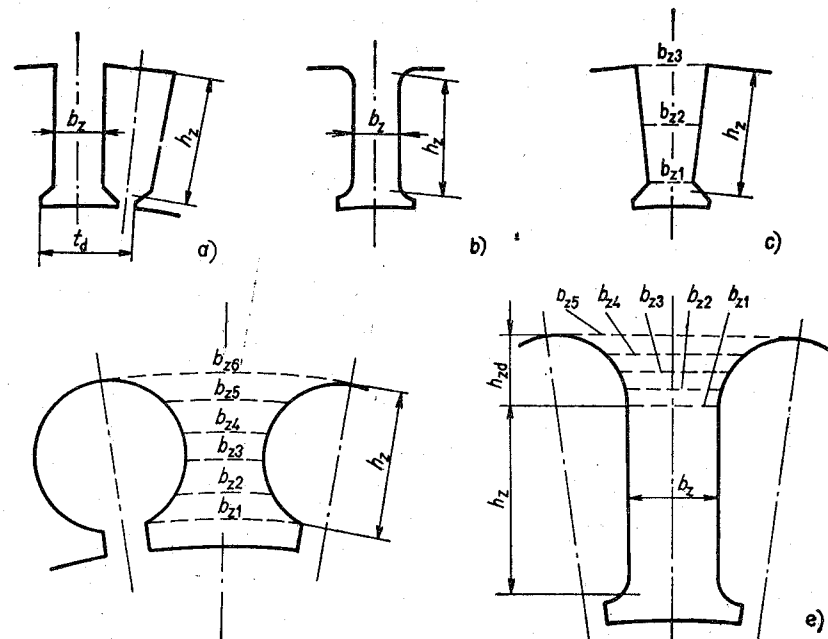
Pro hladký rotor (uzavřené drážky) je $k_{Cr} = 1$.

Protože indukční čára jedné pólové dvojice prochází dvakrát vzduchovou mezerou, je magnetické napětí

$$U_{\delta} = 1,6B_{\delta}\delta k_C \cdot 10^6 \quad [A; T, m] \quad (188)$$

c) Magnetické napětí pro zuby vypočítáme podle obecné rovnice pro dvě cesty zuby statoru

$$U_{zs} = 2H_{zs}b_{zs} \quad (189a)$$



Obr. 75. Rozměry zubů pro určení magnetického napětí U_z

Tabulka 13. Magnetizační

B [T]	H [A/m]		B [T]	H [A/m]		
	Et -/0,5	Et 1,3/0,35		ocelolitina	Et -/0,5	Et 1,3/0,35
0,00			0,50	140	130	98
1	10		1	140	130	100
2	20		2	140	140	102
3	30		3	150	140	104
4	40		4	150	140	106
5	50		5	160	140	109
6	50		6	160	140	112
7	60		7	170	150	115
8	60		8	170	150	117
9	70		9	180	150	120
0,10	70		0,60	180	150	123
1	80		1	180	150	126
2	80		2	190	160	130
3	80		3	190	160	133
4	90		4	200	160	137
5	90		5	200	160	140
6	90		6	210	170	144
7	100		7	210	170	149
8	100		8	220	170	153
9	100		9	220	180	157
0,20	100	39	0,70	220	180	161
1	100	41	1	230	180	165
2	100	42	2	230	190	170
3	100	44	3	240	190	175
4	100	46	4	240	190	180
5	100	48	5	250	190	185
6	100	50	6	260	200	192
7	110	52	7	270	200	199
8	110	54	8	270	200	206
9	110	56	9	280	210	213
0,30	110	58	0,80	290	210	220
1	110	60	1	290	210	227
2	110	62	2	300	200	234
3	119	64	3	310	220	241
4	110	66	4	320	230	248
5	110	68	5	320	230	255
6	110	70	6	330	230	262
7	110	72	7	330	240	270
8	120	74	8	340	240	278
9	120	76	9	350	240	286
0,40	120	78	0,90	360	250	294
1	120	80	1	370	250	302
2	120	82	2	380	260	311
3	120	84	3	390	260	320
4	120	86	4	400	270	330
5	120	88	5	410	270	340
6	130	90	6	430	280	350
7	130	92	7	440	280	362
8	130	94	8	450	290	375
9	130	96	9	460	290	387

charakteristika oceli

H ₁ ve jhu Et 2,6/0,5	B [T]	H [A/m]			H ₁ ve jhu Et 2,6/0,5
		ocelolitina	Et -/0,5	Et 1,3/0,35	
130	1,00	470	300	400	250
130	1	490	310	412	260
130	2	500	310	425	260
130	3	529	320	440	270
130	4	540	330	455	270
140	5	550	330	470	280
140	6	570	340	485	290
140	7	590	350	500	290
140	8	610	360	518	300
140	9	630	360	537	300
140	1,10	650	370	555	310
140	1	679	380	575	310
150	2	690	390	595	320
150	3	710	400	615	330
150	4	740	410	635	340
150	5	760	420	660	350
150	6	790	430	685	350
150	7	820	450	710	360
160	8	850	460	735	370
160	9	880	470	765	380
160	1,20	910	480	796	390
170	1	950	500	830	499
170	2	990	510	860	410
170	3	1 030	530	890	420
180	4	1 080	540	930	430
180	5	1 120	560	970	440
180	6	1 160	570	1 010	450
190	7	1 210	590	1 050	460
190	8	1 260	610	1 100	470
190	9	1 310	630	1 150	480
190	1,30	1 360	650	1 200	500
190	1	1 410	670	1 250	520
190	2	1 470	690	1 300	530
190	3	1 530	720	1 350	540
190	4	1 600	750	1 400	560
190	5	1 660	770	1 450	580
200	6	1 720	800	1 500	590
200	7	1 790	830	1 550	610
200	8	1 880	870	1 600	620
210	9	1 960	910	1 670	640
210	1,40	2 050	950	1 750	660
310	1	2 130	1 010	1 820	680
220	2	2 220	1 070	1 900	700
220	3	2 310	1 130	2 000	730
220	4	2 400	1 190	2 100	750
230	5	2 500	1 270	2 220	770
230	6	2 650	1 350	2 350	800
240	7	2 750	1 440	2 500	820
240	8	2 870	1 530	2 650	850
250	9	3 000	1 630	2 800	880

Tabulka 13 —

B [T]	H [A/m]					
	Ocelolitina	Et 3,6	Et 3,0	Et 2,6	Et 2,0	Et 1,3/0,35
1,50	3 150	1 500	1 600	1 650	1 700	3 000
1	3 300	1 630	1 720	1 820	1 900	3 250
2	3 450	1 760	1 860	1 990	2 090	3 550
3	3 650	1 900	2 000	2 140	2 270	3 850
4	3 800	2 030	2 170	2 300	2 450	4 200
5	4 000	2 200	2 300	2 450	2 660	4 500
6	4 150	2 340	2 500	2 630	2 870	4 950
7	4 350	2 500	2 700	2 850	3 100	5 350
8	4 550	2 700	2 900	3 080	3 300	5 800
9	4 800	2 900	3 100	3 300	3 550	6 250
1,60	5 000	3 100	3 300	3 500	3 800	6 700
1	5 200	3 300	3 600	3 800	4 100	7 250
2	5 400	3 600	3 800	4 100	4 400	7 800
3	5 700	3 800	4 100	4 400	4 600	8 400
4	6 000	4 000	4 400	4 700	5 000	9 100
5	6 250	4 300	4 700	5 000	5 300	10 000
6	6 550	4 600	5 000	5 300	5 600	10 700
7	6 850	5 000	5 300	5 700	6 000	11 500
8	7 200	5 300	5 600	6 000	6 400	12 300
9	7 550	5 600	6 000	6 400	6 800	13 100
1,70	7 850	6 000	6 300	6 800	7 200	13 800
1	8 200	6 400	6 700	7 300	7 800	14 600
2	8 600	6 700	7 100	7 700	8 100	15 400
3	9 000	7 100	7 600	8 100	8 600	16 200
4	9 500	7 600	8 000	8 600	9 100	17 000
5	10 000	8 000	8 500	9 000	9 600	17 800
6	10 500	8 500	9 000	9 500	10 100	18 800
7	11 000	8 900	9 400	10 000	10 700	20 000
8	11 500	9 400	9 900	10 600	11 300	21 500
9	12 000	9 900	10 400	11 100	11 900	23 000
1,80	12 500	10 400	11 000	11 800	12 500	24 500
1	13 000	10 900	11 600	12 400	13 300	
2	13 600	11 500	12 200	13 000	13 900	
3	14 300	12 000	12 800	13 600	14 600	
4	15 000	12 700	13 400	14 200	15 300	
5	15 800	13 300	14 200	14 900	16 000	
6	16 500	14 000	14 900	15 600	16 700	
7	17 300	14 600	15 600	16 500	17 600	
8	18 000	15 200	16 300	17 300	18 500	
9	19 000	15 900	17 100	18 100	19 400	
1,90	20 000	16 700	17 900	19 000	20 300	
1	21 500	17 500	18 700	20 000	21 300	
2	23 000	18 300	19 500	20 900	22 300	
3	24 000	19 100	20 400	21 800	23 400	
4	25 200	20 000	21 200	22 800	24 300	
5	26 500	21 000	22 300	23 900	25 300	
6	28 000	21 900	23 400	24 800	26 200	
7	29 500	22 900	24 300	25 700	27 100	
8	31 500	24 000	25 200	26 600	28 100	
9	33 000	25 000	26 100	27 800	29 000	

pokračování

H _J ve jhu Et 2,6	B [T]	H [A/m]			
		Et 3,6	Et 3,0	Et 2,6	Et 2,0
910	2,00	25 000	27 000	28 000	30 000
940	1	27 000	28 000	30 000	31 000
980	2	28 000	29 000	31 000	32 000
1 010	3	29 000	31 000	33 000	35 000
1 050	4	31 000	33 000	35 000	37 000
1 080	5	32 000	35 000	36 000	39 000
1 120	6	34 000	36 000	38 000	41 000
1 160	7	36 000	38 000	40 000	43 000
1 200	8	38 000	40 000	42 000	45 000
1 260	9	40 000	42 000	45 000	48 000
1 310	2,10	42 000	45 000	47 000	50 000
1 360	1	44 000	47 000	50 000	53 000
1 410	2	47 000	50 000	53 000	56 000
1 470	3	49 000	52 000	56 000	59 000
1 520	4	52 000	55 000	59 000	62 000
1 600	5	55 000	58 000	62 000	65 000
1 660	6	58 000	61 000	66 000	69 000
1 740	7	61 000	65 000	69 000	73 000
1 800	8	65 000	68 000	73 000	77 000
1 850	9	69 000	72 000	77 000	81 000
1 970	2,20	72 000	76 000	81 000	86 000
2 050	1	77 000	80 000	86 000	90 000
2 150	2	81 000	85 000	91 000	96 000
2 230	3	86 000	90 000	97 000	102 000
2 320	4	91 000	96 000	102 000	108 000
2 430	5	96 000	102 000	108 000	115 000
2 550	6	102 000	108 000	116 000	123 000
2 670	7	108 000	115 000	124 000	131 000
2 800	8	116 000	123 000	131 000	139 000
2 900	9	125 000	130 000	139 000	147 000
3 070	2,30	132 000	138 000	147 000	154 000
3 200	1	140 000	146 000	154 000	162 000
3 400	2	148 000	155 000	162 000	170 000
3 540	3	157 000	162 000	170 000	178 000
	4	166 000	171 000	178 000	186 000
	5	174 000	179 000	186 000	194 000
	6	182 000	187 000	194 000	202 000
	7	189 000	195 000	202 000	210 000
	8	197 000	203 000	211 000	217 000
	9	205 000	211 000	218 000	225 000
	2,40	214 000	220 000	226 000	234 000
	1	222 000	228 000	235 000	242 000
	2	230 000	236 000	243 000	250 000
	3	238 000	244 000	251 000	258 000
	4	246 000	252 000	259 000	266 000
	5	254 000	260 000	267 000	275 000
	6	262 000	268 000	275 000	283 000
	7	271 000	276 000	283 000	292 000
	8	279 000	284 000	291 000	301 000
	9	287 000	293 000	298 000	309 000

a pro dvě cesty zuby rotoru

$$U_{zr} = 2H_{zr}h_{zr} \quad (189b)$$

kde H_z je intenzita magnetického pole závislá na příslušné magnetické indukci,

h_z výška zubu.

Veličiny H_z a h_z je třeba zvlášť určit podle tvaru zubu.

c1) *Zuby s rovnoběžnými boky* (obr. 75a, b). Rovnoběžné zuby vycházejí u lichoběžníkových drážek. Magnetická indukce je v každém místě stejná a závisí na indukci ve vzduchové mezeře. Určí se z předpokladu, že celý magnetický tok připadající na jednu drážkovou rozteč přejde ze vzduchové mezery do zubu. Platí tedy

$$B_0 t_d l_e = B_z b_z l_e k_{Fe}$$

kde k_{Fe} je činitel plnění železa, vyjadřující zmenšení aktivního průřezu izolací mezi plechy (čl. 3.1.2 odst. 16).

Z uvedené podmínky vychází magnetická indukce v zubu

$$B_z = B_0 \frac{t_d}{b_z k_{Fe}} \quad (190)$$

Pro tuto magnetickou indukci zjistíme z magnetizační křivky příslušnou intenzitu magnetického pole.

Magnetizační křivka pro ocelové materiály je udána ve formě tabulky (tab. 13), která umožňuje přesnější čtení než obvykle používané grafy.

Zmenšení magnetické indukce a tím i intenzity magnetického pole v rozšířeném uzávěru, popřípadě zaobleném dně, se vyjádří tak, že výška zubu se uvažuje od poloviny uzávěru nebo zaoblení u dna (obr. 75a, b).

c2) *Zuby s lichoběžníkovými boky* (obr. 75c). Tyto zuby jsou u paralelních drážek. Magnetická indukce je v každém místě zubu jiná a má průběh podobný jako intenzita magnetického pole na obr. 76. Pro libovolnou šířku zubu b_z se buď určí magnetická napětí z rovnice (190), nebo pro známou magnetickou indukci v určité šířce se na jinou šířku přepočte jednoduchou úměrou.

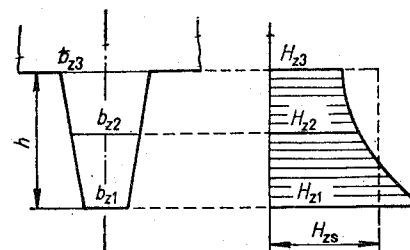
Každé magnetické indukci odpovídá z magnetizační charakteristiky určitá intenzita magnetického pole H . Při výpočtu magnetického napětí U_z musíme počítat s její střední hodnotou H_{zs} , kterou získáme přeměnou vyznačené plochy na rovnoplochy obdélník (obr. 76).

Zkráceně můžeme střední intenzitu magnetického pole získat z upravené Simpsonovy poučky pro výpočet nepravidelné plochy

$$H_{zs} = \frac{1}{6} (H_{z1} + 4H_{z2} + H_{z3}) \quad (191a)$$

kde H_{z1} , H_{z2} , H_{z3} jsou intenzity magnetického pole odpovídající magnetickým indukci v nejužším místě zubu B_{z1} , v jeho polovině B_{z2} a u kořene zubu B_{z3} .

U polozavřeného drážky (obr. 75c) se h_z opět počítá jen od poloviny uzávěru.



Obr. 76. Intenzita magnetického pole v lichoběžníkovém zubu

c3) *Kruhová drážka* (obr. 75d). Střední intenzitu magnetického pole určíme podle Simpsonova vzorce

$$H_{zs} = \frac{1}{12} (H_{z1} + 4H_{z2} + 2H_{z3} + 4H_{z4} + H_{z5}) \quad (191b)$$

c4) *Půlkruhové dno drážky* (obr. 75e). Střední intenzitu magnetického pole H_{zd} u kořene zubu, který tvoří půlkruhové dno drážky, lze určit opět Simpsonovým vzorcem z intenzit H_{z1} až H_{z5} určených pro indukce v šířkách b_{z1} až b_{z5} a dosazením do rovnice (191b).

Celkové magnetické napětí pro celý zub s půlkruhovým uzávěrem drážky potom je

$$U_z = H_z h_z + H_{zd} h_{zd} \quad (191c)$$

Poznámka. Uvedené vztahy platí potud, pokud je $B_z < 1,8$ T. Při větších magnetických indukci v zubu se část magnetického toku vytlačí do prostoru drážky a skutečná magnetická indukce v zubu je menší. Magnetická indukce, která v takovém případě vychází z geometrických rozměrů zubu, představuje jen zdánlivou indukci B_z' . Skutečná indukce, pro kterou musíme určovat intenzitu magnetického pole H_z je

$$B_z = B_z' - 1,25k_z H \cdot 10^{-6} \quad (192)$$

kde H je intenzita magnetického pole pro zdánlivou indukci B_z' ,
 k_z činitel zmenšení magnetické indukce v zubu

$$k_z = \frac{b_d}{b_z k_{Fe}} \quad (193)$$

přičemž b_d je střední šířka drážky,
 b_z střední šířka zubu.

d) Magnetické napětí pro jeho statoru a rotoru. Jhem statoru a rotoru se uzavírá jen poloviční magnetický tok, takže maximální hodnota magnetické indukce ve jhu statoru (na rozhraní pólů) je

$$B_{js} = \frac{\Phi}{2h_{js}l_{ekFe}} \quad [\text{T}; \text{Wb}, \text{m}, \text{m}] \quad (194)$$

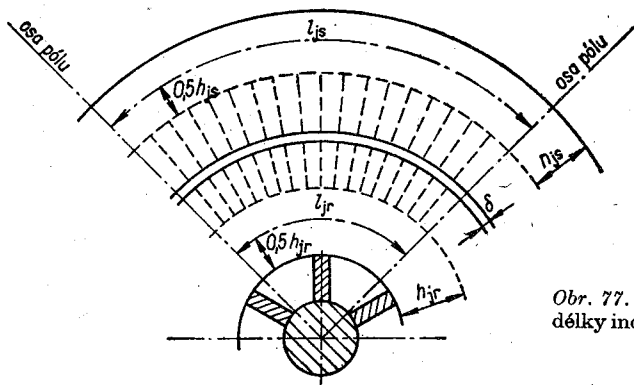
a podobně ve jhu rotoru

$$B_{jr} = \frac{\Phi}{2h_{jr}l_{ekFe}} \quad [\text{T}; \text{Wb}, \text{m}, \text{m}] \quad (195)$$

kde součin $h_{j}l_{ekFe}$ dává činný průřez jha statoru, popřípadě rotoru.

Vzhledem k sinusovému rozložení magnetického toku je skutečná magnetická indukce v každém místě jiná, a proto je určení příslušné intenzity komplikované.

Podle Arnolda můžeme střední hodnoty intenzit H_{js} a H_{jr} určit ze zvlášť přepočítaných magnetizačních charakteristik pro maximální hodnoty magnetických indukci B_{js} a B_{jr} . Příklad takové přepočítané charakteristiky pro běžné dynamové plechy je údaj H_j v tab. 13.



Obr. 77. Určení střední délky indukční čáry ve jhu

Za střední délku indukční čáry ve jhu můžeme potom považovat polovinu pólové rozteče l_{js} měřená uprostřed jha, takže pro jeho statoru je magnetické napětí (obr. 77)

$$U_{js} = \frac{1}{2} H_{js} l_{js} \quad (196)$$

a pro jeho rotoru podobně (obr. 77)

$$U_{jr} = \frac{1}{2} H_{jr} l_{jr} \quad (197)$$

e) Celkové magnetomotorické napětí pro jednu pólovou dvojici je dáno součtem všech dílčích magnetických napětí

$$F = U_{\delta} + U_{zs} + U_{zr} + U_{js} + U_{jr} \quad [\text{A}] \quad (198)$$

Mírou magnetického nasycení obvodu je, podobně jako u elektromagnetů, činitel nasycení daný poměrem

$$k_s = \frac{F}{U_{\delta}} \quad (199)$$

f) Magnetizační proud, potřebný k vybuzení magnetického toku, je (podle prvního dílu) pro $m = 3$ dán vztahem

$$I_{\mu} = \frac{pF}{2,7N_{s1}k_{v1}}$$

3.1.3.2. Ztrátový proud

Ztrátový proud (činný) je dán celkovými ztrátami naprázdno, které u běžných typů motorů představují součet ztrát v železe a ztrát mechanických.

a) Ztráty v železe závisí na hmotnosti zubů statorového jha.

Hmotnost statorových zubů je

$$m_{zs} = Q_1 b_{zs} h_{zsc} l_{ekFe} \gamma \quad [\text{kg}; \text{m}, \text{m}, \text{m}, -, \text{kg}/\text{m}^3] \quad (201)$$

kde b_{zs} je střední šířka zubu,

h_{zsc} celková výška zubu (měřená od dna drážky až na jeho konec),

γ měrná hmotnost plechů 7700 kg/m³ nebo podle tab. 1.

Hmotnost statorového jha je

$$m_{js} = \pi d_{js} h_{js} l_{ekFe} \gamma \quad (202)$$

Ztráty v zubech rotoru a v jeho jhu můžeme zanedbat, neboť za chodu je kmitočet rotorového proudu malý, úměrný jen malému skluzu. Musíme jej respektovat jen u strojů s dlouhým rozběhem.

Podle Richtra jsou ztráty v železe indukčních motorů

$$\Delta P_{Fe} = B_{zs}^2 m_z \left[1,2 \Delta p_h \frac{f}{50} + 1,5 \Delta p_w \left(\frac{f}{50} \right)^2 \right] + B_j^2 m_j \left[2 \Delta p_h \frac{f}{50} + 1,8 \Delta p_w \left(\frac{f}{50} \right)^2 \right] \quad (203)$$

kde m_z je hmotnost zubů statoru,
 m_j hmotnost statorového jha,
 B_{zs} geometrická střední hodnota magnetické indukce v zubu,
 B_j maximální indukce ve jhu,
 Δp_h jmenovité měrné hysterezní ztráty,
 Δp_w jmenovité ztráty způsobené vířivými proudy,
 Δp_h a Δp_w jsou složky jmenovitých měrných ztrát

$$\Delta p_{1,0} = \Delta p_h + \Delta p_w$$

V závodech se určují měření ve vzorcích každé dodávky plechu. Pro obvyklé dynamové plechy tloušťky 0,5 mm a s měrnými ztrátami 2,6 W/kg jsou

$$\Delta p_h = 1,5 \text{ W/kg} \quad \text{a} \quad \Delta p_w = 1,1 \text{ W/kg}$$

U rovnoběžných zubů se za magnetickou indukci B_{zs} dosadí skutečná magnetická indukce v zubu.

U lichoběžníkových zubů se magnetická indukce B_{zs} určí z největší (B_{z1}) a nejmenší magnetické indukce (B_{z3}) — obr. 75c.

$$B_{zs} = \sqrt{B_{z1} B_{z3}}$$

Obvykle známe B_{z1} a B_{z3} určíme z úměry

$$\frac{B_{z1}}{B_{z3}} = \frac{b_{z3}}{b_{z1}}; \quad B_{z3} = B_{z1} \frac{b_{z1}}{b_{z3}}$$

takže po dosazení dostaneme

$$B_{zs} = \sqrt{B_{z1} B_{z1} \frac{b_{z1}}{b_{z3}}} = B_{z1} \sqrt{\frac{b_{z1}}{b_{z3}}} \quad (204)$$

Pro obvyklé plechy s měrnými ztrátami $\Delta p_{1,0} = 2,6 \text{ W/kg}$ a pro kmitočty 50 Hz vychází z rovnice (203)

$$\Delta P_{Fe} = 3,45 B_{zs}^2 m_{zs} + 4,98 B_{js}^2 m_{js} \quad [\text{W}; \text{T}, \text{kg}] \quad (205)$$

b) Mechanické ztráty představují ztráty v ložiskách, ztráty ventilační a u kroužkových motorů i ztráty způsobené třením kartáčů. Jejich odhad je nepřesný, neboť závisí na kvalitě mechanického opracování, které nemůžeme předem spolehlivě stanovit.

Ztráty v ložiskách a ventilační ztráty můžeme přibližně odhadnout ze vztahu

$$\Delta P_m = 30 \frac{P^{0,9}}{\sqrt{p}} \quad [\text{W}; \text{kW}] \quad (206)$$

c) Ztrátový proud se určí z celkových ztrát naprázdno

$$I_{Fe} = \frac{\Delta P_0}{3U_1} = \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_m}{3U_1} \quad (207)$$

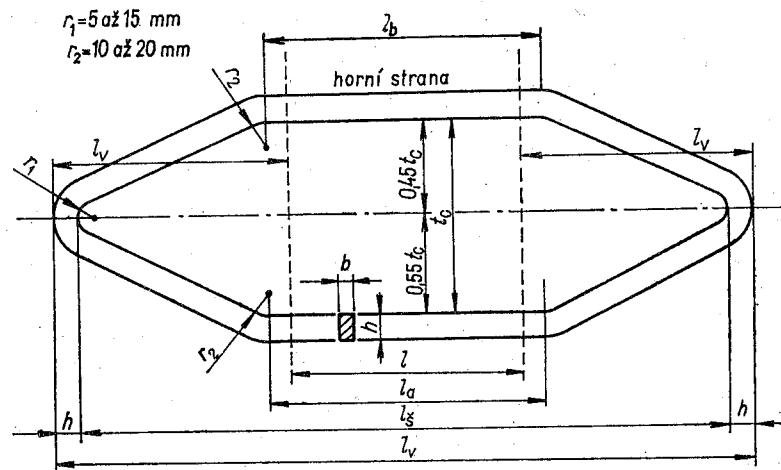
3.1.3.3. Výpočet odporu

a) Mechanické zhotovení vinutí je třeba navrhnut vzhledem k přesnému určení délky závitu a odporu.

Stejně tak musíme navrhnut vnitřní rozteč cívky dvouvrstvého vinutí a rozteč navíjeného vodiče na šablonu (obr. 78), který je

$$t_c = (3,7 \text{ až } 4,0) \frac{d}{2p} \cdot \frac{y}{t_p} \quad (208)$$

kde d je vrtání statoru,
 y/t_p zkrácení kroku.



Obr. 78. Rozměry šablony pro statorovou cívku

Délka cívkové strany ve spodní vrstvě je

$$l_a = l + (10 \text{ až } 20) \quad [\text{mm}] \quad (209)$$

a v horní vrstvě

$$l_b = l_a + (10 \text{ až } 30) \quad [\text{mm}] \quad (210)$$

Vnitřní délka šablony bývá pro $2p > 2$

$$l_s = l + (0,7 \text{ až } 1,2) t_c \quad (211)$$

a pro $2p = 2$

$$l_s = l + t_c \quad (212)$$

Průřez cívkové strany ($b \times h$) se určí zaokrouhlením průřezu jedné strany cívky v drážce.

Celková délka cívky na šabloně je

$$l_c = l_s + 2h \quad (213)$$

a z ní se dá určit vyložení čel, potřebné pro nakreslení sestavy a pro výpočet chladičeho povrchu čel

$$l_v = \frac{l_c - l}{2} \quad (214)$$

Cívková šablona se nakreslí ve vhodném měřítku a z výkresu se přesně přečte délka čela l_{c1} , která byla na začátku návrhu jen odhadnuta.

b) Odpor vinutí jedné fáze určíme z přesně vypočtených odporů, odpovídajících skutečným, upraveným průřezům a rozměrům

$$R_1 = \frac{\rho 2(l + l_{c1}) N_{s1}}{2a S_1} \quad (215)$$

$$R_T = \rho \frac{l_T}{S_T}; \quad R_K = \rho \frac{\pi d_K}{S_K} \quad (216)$$

$$R_2 = \frac{1}{p} \left[R_T + 2R_K \frac{Q_2}{(2\pi p)^2} \right] \quad (217)$$

$$R_{21} = R_2 \frac{4pm_1 N_{s1}^2 k_{v1}^2}{Q_2} \quad (218)$$

a je

$$R = R_1 + R_{21} \quad (219)$$

3.1.3.4. Výpočet reaktance

Reaktance představuje veličinu, která jen číselně vyjadřuje vliv rozptylového toku na vnitřní poměry ve stroji. U indukčního motoru se rozptylem rozumí ta část magnetického toku, která neprochází vzduchovou mezerou, ale uzavírá se nakrátko kolem statorového a rotorového vinutí. Musíme rozlišovat: *drážkový rozptyl*, *rozptyl okolo čel vinutí* a *diferenční rozptyl*.

Každému rozptylovému toku odpovídá příslušná náhradní reaktance. Obecně je náhradní reaktance dána vztahem

$$X_\sigma = \omega L_\sigma = \omega N^2 A_\sigma \quad [\Omega] \quad (220)$$

kde L_σ je náhradní rozptylová indukčnost,

A_σ magnetická vodivost rozptylové cesty,

N počet závitů, kterými je rozptylový tok buzen.

K určení reaktance musíme stanovit vodivost rozptylové cesty. Obvykle se přitom magnetický odpor železa zanedbává a počítá se jen s vodivostí vzduchové cesty.

a) Drážková reaktance

Jedna fáze má $2pq$ drážek, takže její celková rozptylová vodivost je

$$2pq A_d$$

kde A_d je magnetická vodivost jedné drážky.

V jedné drážce je

$$V_d = \frac{2N_s}{2pq} \quad (221)$$

vodičů, které budí rozptylové pole. Drážková reaktance tedy je

$$X_d = \omega 2pq A_d V_d^2 = 2\pi f 2pq A_d \left(\frac{2N_s}{2pq} \right)^2 = \frac{4\pi f A_d}{pq} N_s^2 \quad [\Omega; \text{Hz}, \text{H}] \quad (222)$$

Zvlášť počítáme reaktanci X_{d1} pro statorové drážky a zvlášť reaktanci X_{d2} pro rotorové drážky. Velikost X_{d2} přepočítáme na stator (X_{d21}) stejně jako odpor.

a) Vodivost otevřené drážky. Nejjednodušší otevřená drážka je na obr. 79. Zvlášť určujeme vodivost prostoru nad vodiči, jehož indukční čáry jsou buzeny plným počtem vodičů v drážce a zvlášť určujeme i vodivost prostoru vyplněného vodiči, jehož každá indukční čára je buzena jiným počtem vodičů.

Prostor nad vodiči má vodivost

$$A_v = \mu_0 \frac{h_v l_e}{b_d} = 1,25 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{h_v l_e}{b_d} \quad (223)$$

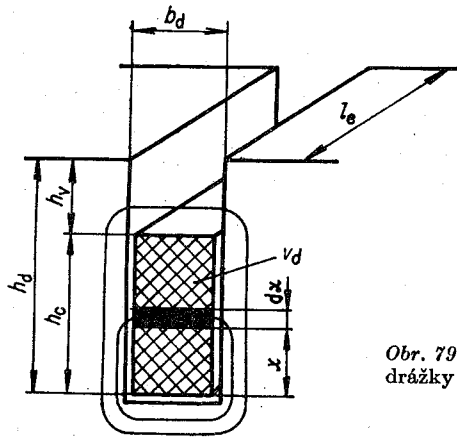
kde b_d je délka indukční čáry [m],

$h_v l_e$ průřez, kterým procházejí indukční čáry [m²].

Protože v každém výrazu pro vodivost drážkového prostoru bude výraz $\mu_0 l_e$, budeme zvlášť vyjadřovat jen tzv. jednotkovou vodivost λ , odpovídající jednotkové délce a jednotkové permeabilitě.

Jednotková vodivost prostoru nad vodiči s rovnoběžnými stěnami je dána vztahem

$$\lambda_v = \frac{h_v}{b_d} \quad (224)$$



Obr. 79. Výpočet magnetické vodivosti drážky

Prostor vyplněný vodiči má jednotkovou vodivost

$$\lambda_c = \frac{h_c}{b_d}$$

kteřou však nemůžeme použít pro výpočet reaktance. Musíme určit tzv. náhradní jednotkovou vodivost, přepočtenou na plný počet vodičů v drážce:

Elementární úsek výšky dx ve vzdálenosti x od spodního okraje prostoru vyplněného vodiči má jednotkovou vodivost

$$d\lambda'_c = \frac{dx}{b_d}$$

a je buzen

$$\frac{V_d}{h_c} x \text{ vodiči}$$

takže jeho elementární náhradní indukčnost je

$$d\lambda'_c \left(\frac{V_d}{h_c} x \right)^2 = \frac{dx}{b_d} \left(\frac{V_d}{h_c} x \right)^2 = V_d^2 \frac{x^2 dx}{h_c^2 b_d}$$

Pro celý prostor a plný počet vodičů je

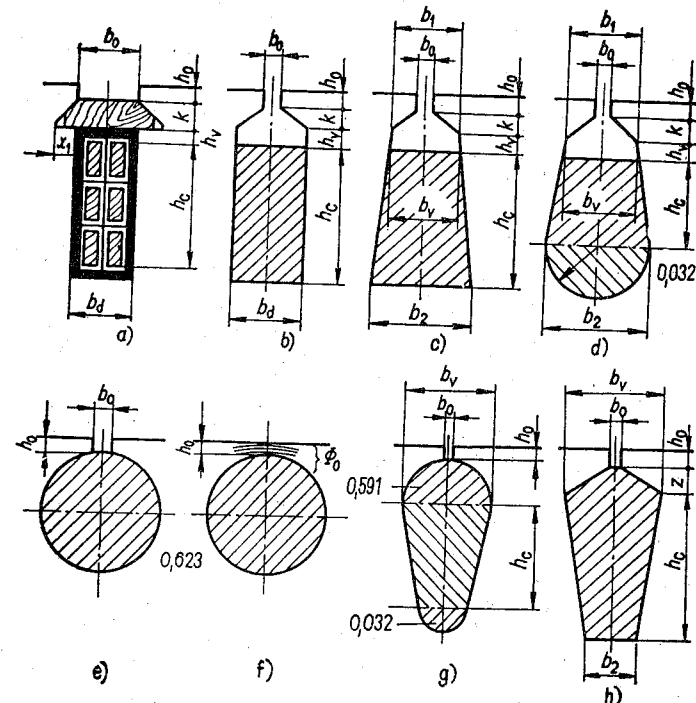
$$\lambda'_c V_d^2 = \int_0^{h_c} V_d^2 \frac{x^2 dx}{h_c^2 b_d} = \frac{V_d^2}{h_c^2 b_d} \left| \frac{x^3}{3} \right|_0^{h_c} = V_d^2 \frac{h_c}{3b_d}$$

Po úpravě vyjde náhradní jednotková vodivost

$$\lambda'_c = \frac{h_c}{3b_d} \quad (225)$$

Vodivost celé otevřené drážky je potom

$$\Lambda_d = \mu_0 l_e (\lambda_v + \lambda'_c) = \mu_0 l_e \left(\frac{h_v}{b_d} + \frac{h_c}{3b_d} \right) \quad [H] \quad (226)$$



Obr. 80. Příklady drážek pro určení náhradní magnetické vodivosti

Pozor!

Rozměr h_c se musí měřit podle obr. 80a.

a2) Otevřená drážka s klínem (obr. 80a). Můstek uzávěru má jednotkovou vodivost

$$\lambda_0 = \frac{h_0}{b_0} \quad (227)$$

Jednotková vodivost výřezu pro klín je (podle ON 350868 — Drážky pro vinutí) dána výrazem

$$\lambda_k = \frac{2,3k}{2b_d + x_1} \quad (228)$$

takže vodivost celé drážky je

$$A_d = \mu_0 l_e \left(\frac{h_v}{b_d} + \frac{h_c}{3b_d} + \frac{h_0}{b_0} + \frac{2,3k}{2b_d + x_1} \right) \quad [H] \quad (229)$$

a3) Polozavřená drážka (obr. 80b). Lichoběžníkový klínový uzávěr má podle ON 350868 jednotkovou vodivost

$$\lambda_k = \frac{2,3k}{b_d + b_0} \quad (230)$$

a vodivost celé drážky je

$$A_d = \mu_0 l_e \left(\frac{h_v}{b_d} + \frac{h_c}{3b_d} + \frac{h_0}{b_0} + \frac{2,3k}{b_d + b_0} \right) \quad [H] \quad (231)$$

a4) Lichoběžníková drážka s rovným dnem (obr. 80c). Podle Richtra se má za šířku prostoru vyplněného vodiči brát rozměr b_v , takže

$$A_d = \mu_0 l_e \left(\frac{h_c}{3b_v} + \frac{h_v}{b_v} + \frac{2,3k}{b_1 + b_0} + \frac{h_0}{b_0} \right) \quad [H] \quad (232)$$

a5) Kruhová drážka otevřená (obr. 80e). Bez ohledu na rozměry je jednotková vodivost

$$\lambda'_k = 0,623 \quad (233)$$

Vodivost spodního půlkruhu je

$$\lambda'_{ks} = 0,032 \quad (234)$$

Vodivost horního půlkruhu představuje zbytek

$$\lambda'_{kh} = 0,623 - 0,032 = 0,591 \quad (235)$$

Tyto výsledky je možné odvodit použitím integrálního počtu. Pro celou otevřenou kruhovou drážku je

$$A_d = \mu_0 l_e \left(0,623 + \frac{h_0}{b_0} \right) \quad [H] \quad (236)$$

a6) Kruhová drážka zavřená (obr. 80f). Vodivost úzkého můstku výšky h_0 se určí z maximálního toku, který se jím může uzavírat

$$\Phi_{0 \max} = B_{\max} l_e h_0 k_{Fe} \quad [Wb; T, m, m, -] \quad (237)$$

a ze kterého podle Hopkinsonova zákona je

$$A_0 = \frac{\Phi_{0 \max}}{I_T \sqrt{2}} \quad [H; Wb, A] \quad (238)$$

Za B_{\max} se dosazuje asi 2,2 T. Vodivost celé drážky je potom

$$A_d = \mu_0 l_e 0,623 + A_0 \quad [H] \quad (239)$$

a7) Lichoběžníková drážka s půlkruhovým dnem (obr. 80d). Podle předcházejícího je

$$A_d = \mu_0 l_e \left(0,032 + \frac{h_v}{b_v} + \frac{h_c}{3b_v} + \frac{2,3k}{b_1 + b_0} + \frac{h_0}{b_0} \right) \quad [H] \quad (240)$$

a8) Rotorové lichoběžníkové drážky. Používají se u hliníkových stříkaných klecí. Drážka podle obr. 80g má vodivost

$$A_d = \mu_0 l_e \left(0,032 + \frac{h_c}{3b_v} + 0,591 + \frac{h_0}{b_0} \right) \quad [H] \quad (241)$$

a drážka podle obr. 80h

$$A_d = \mu_0 l_e \left(\frac{h_c}{3b_v} + \frac{2z}{3b_v} + \frac{h_0}{b_0} \right) \quad [H] \quad (242)$$

Pro úplně zavřené drážky musíme ještě připočítat vodivost můstku podle (238).

a9) Drážková vodivost dvouvrstvových vinutí. U dvouvrstvových vinutí se zkráceným krokem jsou v některých drážkách vodiče různých fází s proudy proti sobě časově posunutými. Buzení rozptylového toku okolo takových drážek je menší než v drážkách s proudy téže fáze. Je tedy drážková vodivost při zkráceném kroku A_{dy} menší než vodivost A_d uvažovaná pro plný krok.

Zmenšení drážkové vodivosti zkrácením kroku se vyjádří činitelem k_{dy} , který je podle Postnikova

$$k_{dy} = 0,75 \frac{y}{t_p} + 0,25 \quad (243)$$

takže zmenšená vodivost je

$$A_{dy} = k_{dy} A_d \quad [\text{H}] \quad (244)$$

b) Z určených magnetických vodivostí vypočteme drážkovou reaktanci statoru

$$X_{d1} = \frac{4\pi f}{pq_1} N_{s1}^2 A_{d1y} \quad [\Omega; \text{Hz}, \text{H}] \quad (245)$$

drážková reaktance rotoru

$$X_{d21} = \frac{4\pi f}{pq_2} N_{s2}^2 A_{d2} \frac{4pm_1 N_{s1}^2 k_v^2}{Q_2} \quad [\Omega] \quad (246)$$

u klece je $N_{s2} = 0,5$ a $q_2 = 0,5$.

c) Reaktance rozptylu okolo čel

Přesné vypočtení vodivosti rozptylových cest kolem čel je obtížné, neboť rozptylový tok je buzen současně několika cívkami různých fází statorového a rotorového vinutí. Vyjadřuje se proto jen jediná společná vodivost kolem čel

$$A_\varepsilon = \mu_0 q_1 l_{\varepsilon 1} \lambda_\varepsilon \quad [\text{H}; \text{H/m}, \text{m}, -]$$

kde jednotková vodivost téměř pro všechny druhy vinutí bývá

$$\lambda_\varepsilon = 0,3$$

Vinutí má počet cívek

$$\frac{Q_1}{2m_1} = pq_1$$

a tedy $2pq_1$ čel a v každém čele je $N_{s1}/(pq_1)$ vodičů, takže reaktance rozptylu okolo čel je

$$\begin{aligned} X_\varepsilon &= 2\pi f \left(\frac{N_{s1}}{pq_1} \right)^2 2pq_1 A_\varepsilon = \\ &= 2\pi f \left(\frac{N_{s1}}{pq_1} \right)^2 2pq_1 \frac{4\pi}{10} \cdot 10^{-6} q_1 l_{\varepsilon 1} \lambda_\varepsilon \quad [\Omega] \end{aligned}$$

po úpravě a dosazení za $\pi^2 \doteq 10$ dostaneme

$$X_\varepsilon = \frac{1}{p} 16f N_{s1}^2 l_{\varepsilon 1} \lambda_\varepsilon \cdot 10^{-6} \quad [\Omega; \text{Hz}, \text{m}, -] \quad (247)$$

d) Reaktance diferenčního rozptylu

Podle čl. 2.2.12 je pro stator

$$X_{dif1} = \sigma_{dif1} \frac{F}{U_\delta} \cdot \frac{U_1}{I_\mu} \quad (248)$$

kde σ_{dif1} se určí z tab. 9 na str. 141.

Reaktance diferenčního rozptylu rotoru, přepočtená na stator se vyjádří rovněž podle vztahu (248), ale pro klec je

$$\sigma_{dif2} = \frac{3,3p^2}{Q_2^2} \quad (249)$$

$$X_{dif21} = \sigma_{dif2} \frac{F}{U_\delta} \cdot \frac{U_1}{I_\mu} \quad (250)$$

e) Celková reaktance je

$$X_\sigma = X_{d1y} + X_{d21} + X_{dif1} + X_{dif21} + X_\varepsilon \quad [\Omega] \quad (251)$$

f) Celkový činitel vazby je (viz první díl)

$$\kappa = \frac{1}{1 + \frac{X_\sigma}{X_\mu}} \quad (252)$$

kde magnetizační reaktance

$$X_\mu = \frac{U_1}{I_\mu} \quad [\Omega; \text{V}, \text{A}] \quad (253)$$

Vypočtená velikost činitele vazby κ se porovná s velikostí zvolenou při výpočtu proudu I_T (čl. 3.1.2 odst. 23).

3.1.3.5. Impedance

Impedance jedné fáze vinutí je dána známým vztahem

$$Z = \sqrt{R^2 + X_\sigma^2} \quad [\Omega] \quad (254)$$

3.1.3.6. Proud nakrátko vypočteme ze vztahu

$$I_{1k} = \frac{U_1}{Z} \quad [\text{A}; \text{V}, \Omega] \quad (255)$$

a porovná se s proudem předpokládaným při určování odporu klece.

Účinník nakrátko je

$$\cos \varphi_k = \frac{R}{Z} \quad (256)$$

3.1.3.7. Kruhový diagram

Kruhový diagram kreslíme podle konstrukce uvedené v prvním dílu; pro motory nad 100 kW je způsob kreslení udán v ČSN 350301. Kreslí se ve zvoleném měřítku proudu m_I [A/mm], kterému odpovídá měřítko výkonu

$$m_P = m_I 3 U_1 \cdot 10^{-3} \quad [\text{kW/mm; A/mm, V}] \quad (257)$$

Z kruhového diagramu čteme: $I_1, I_{21}, \cos \varphi, s$, poměr M_z/M_n a M_{\max}/M_n . Přečtenému skluzu odpovídají otáčky

$$n = n_s(1 - s) \quad (258)$$

Poměr M_z/M_n se porovná s požadovanou velikostí. Při nesouhlasu je nutné odpor rotoru vhodně pozměnit a návrh i jeho kontrolu zopakovat.

Poměr M_{\max}/M_n musí vyhovovat normě.

Z kruhového diagramu se konstruuje momentová charakteristika. Momenty se čtou v měřítku

$$m_M = \frac{9550}{n_s} m_P \quad [\text{Nm/mm; kW/mm, ot/min}]$$

3.1.3.8. Ztráty

a) Ztráty ve vinutí počítáme už z proudů zjištěných z kruhového diagramu

$$\Delta P_{j1} = m_1 R_1 I_1^2 \quad [\text{W}] \quad (259)$$

$$\Delta P_{j2} = m_1 R_{21} I_{21}^2 \quad [\text{W}] \quad (260)$$

b) Ztráty v železe a ztráty mechanické už byly určeny.

c) Ztráty dodatečné ΔP_d v sobě zahrnují:

1. dodatečné ztráty v železe (opracování, magnetické pole v masivních konstrukčních částech),
2. dodatečné ztráty ve vodičích (zvětšení proudové hustoty působením rozptylového magnetického toku) se odhadují na

$$\Delta P_d = 0,05 \cdot P \cdot 10^{-3} \quad [\text{W; kW}] \quad (261)$$

d) Celkové ztráty motoru jsou

$$\Delta P = \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_m + \Delta P_d \quad (262)$$

3.1.3.9. Účinnost

Účinnost se určí z procenta ztrát

$$\Delta p = \frac{\Delta P}{P \cdot 10^3 + \Delta P} \quad [\%; \text{ W. kW, W}] \quad (263)$$

$$\eta = 100 - \Delta p \quad [\%] \quad (264)$$

3.1.4. Návrh ventilátoru

Ventilátor navrhujeme podle čl. 1.4.12.

3.1.5. Výpočet oteplení

Výpočet oteplení, pokud nejde o velké stroje, můžeme zjednodušit tak, že zanedbáme přestup tepla z jedné části do druhé, takže jednotlivé části se oteplují jen těmi ztrátami, které v nich vznikají.

Nejdříve určíme relativní oteplení částí motoru oproti proudu chladicího vzduchu.

3.1.5.1. Statorové vinutí

Teplotní spád se skládá ze dvou částí, potřebných pro:

1. přestup tepla z povrchu do vzduchu,
2. přestup tepla přes izolaci statorových čel

$$\Delta \vartheta'_1 = \frac{\Delta P_{j1}}{\alpha_1 S_{\epsilon 1}} + \frac{\Delta P_{j1} l_1}{\lambda_i S_{\epsilon 1}} \quad [\text{K}] \quad (265)$$

kde chladicí povrch čel je

$$S_{\epsilon 1} = 2\pi d_{s1} l_{s1} \quad [\text{m}^2] \quad (266)$$

kde l_1 je tloušťka izolace statorových čel,

λ_i měrná tepelná vodivost izolace statorových čel (tab. 5),

d_{s1} průměr středu statorových čel,

l_{s1} chladicí obvod statorových čel.

Součinitel přestupu tepla α_1 se určí z diagramu na obr. 6 pro rychlost chladicího vzduchu v_1 , kterou odhadneme asi na 40 % obvodové rychlosti ventilátoru

$$v_1 = 0,4 \frac{\pi D_2 n}{60} \quad [\text{m/s; m, ot/min}] \quad (267)$$

3.1.5.2. Statorový svazek

Chladicí povrch statorových plechů je

$$S_{Fe} = \pi d_e l_e \quad [m^2] \quad (268)$$

a příslušné oteplení oproti chladicímu vzduchu

$$\Delta\theta'_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe}}{\alpha_1 S_{Fe}} \quad [K] \quad (269)$$

3.1.5.3. Rotorové kruhy

Relativní oteplení proti proudu chladicího vzduchu je

$$\Delta\theta'_2 = \frac{\Delta P_{j2}}{\alpha_2 S_{K2}} \quad [K] \quad (270)$$

kde chladicí povrch rotorových kruhů podle obr. 81 je

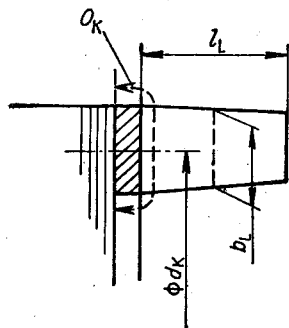
$$S_{K2} = 2\pi d_K O_K + 4n_L b_L l_L \quad [m^2] \quad (271)$$

kde d_K je střední průměr kruhu,

O_K chladicí obvod kruhu,

n_L počet lopatek na kruhu (volený),

b_L, l_L rozměry lopatek podle obr. 81.



Obr. 81. Určení chladicího povrchu rotorových kruhů a lopatek klece

Součinitel přestupu tepla zjistíme z diagramu na obr. 6 pro obvodovou rychlost lopatek

$$v_2 = \frac{\pi d_K n}{60} \quad [m/s; m, ot/min] \quad (272)$$

3.1.5.4. Oteplení vlastního proudu vzduchu

Oteplení vlastního proudu vzduchu určíme z jednotlivých ztrát:

a) Oteplení ventilačními ztrátami

$$\Delta\theta_{vv} = \frac{\frac{2}{3} \Delta P_m}{Q c_p} \quad [K; W, m^3 s^{-1}, J m^{-3} K^{-1}] \quad (273)$$

Přitom předpokládáme, že ventilační ztráty představují asi 2/3 mechanických ztrát.

Veličiny Q a c_p podle čl. 1.4.12.

b) Oteplení způsobené ztrátami v rotoru

$$\Delta\theta_{v2} = \frac{\Delta P_{j2}}{Q c_p} \quad [K] \quad (274)$$

c) Oteplení způsobené ztrátami statoru

$$\Delta\theta_{v1} = \frac{\Delta P_{j1}}{Q c_p} \quad [K] \quad (275)$$

d) Oteplení způsobené ztrátami v železe

$$\Delta\theta_{vFe} = \frac{\Delta P_{Fe}}{Q c_p} \quad (276)$$

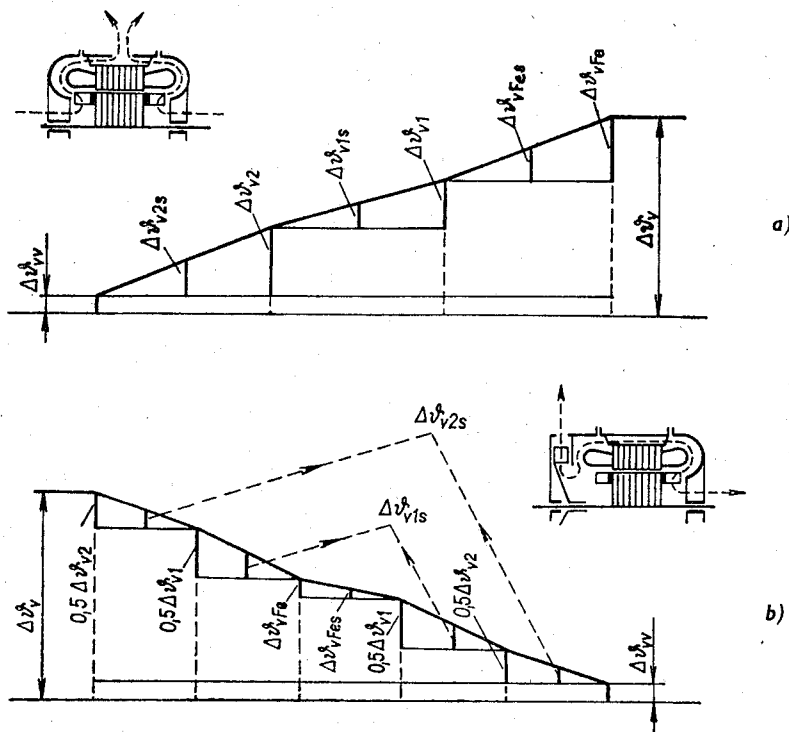
Součet těchto dílčích oteplení by měl dát předpokládané oteplení vzduchu $\Delta\theta_v \doteq 20$ K (čl. 1.4.12).

Jakou část tohoto oteplení je třeba připočítat na relativní oteplení jednotlivých částí, to závisí na způsobu chlazení, tedy na tom, jak se vzduch při průchodu strojem postupně ohřívá. Na obr. 82 jsou vyznačeny dva obvyklé způsoby chlazení a jim odpovídající průběh oteplení chladicího vzduchu.

a) U oboustranného tlačného chlazení (obr. 82a) se odvádí na každé straně polovičním množstvím vzduchu polovina ztrát, takže oteplení je na obou stranách stejné. Oteplení se postupně zvětšuje a za předpokladu vyznačeného rovnoměrného zvětšování můžeme z nakresleného schématu určit střední oteplení vzduchu v okolí příslušné části stroje, a to připočítat k jejich relativnímu oteplení.

b) U jednostranného nasávacího chlazení (obr. 82b) se stejným množstvím vzduchu odvádějí na každé straně poloviční ztráty, takže oteplení vzduchu na jedné straně vzduchu je větší než na straně druhé. K relativnímu oteplení jednotlivých částí se potom připočítá průměrné oteplení vzduchu určené jako střední z oteplení zjištěných na obou stranách stroje.

Pro zvolený způsob chlazení podle vzoru na obr. 82 kreslíme diagram oteplení, z něhož se dají určit střední oteplení.



Obr. 82. Oteplení proudu vzduchu:

a) oboustranné tlačné chlazení, b) jednostranné nasávací chlazení

3.1.5.5. Výsledná oteplení vzhledem k okolí

jsou dána vztahy

$$\Delta\vartheta_1 = \Delta\vartheta'_1 + \Delta\vartheta_{vv} + \Delta\vartheta_{v1s} \quad (277)$$

$$\Delta\vartheta_2 = \Delta\vartheta'_2 + \Delta\vartheta_{vv} + \Delta\vartheta_{v2s} \quad (278)$$

$$\Delta\vartheta_{Fe} = \Delta\vartheta'_{Fe} + \Delta\vartheta_{vv} + \Delta\vartheta_{vFes} \quad (279)$$

Přitom předpokládáme, že ventilačními ztrátami se celý proud vzduchu rovnoměrně oteplí.

Výsledky se porovnávají s dovoleným oteplením (tab. 6).

3.1.6. Mechanický návrh a jeho kontrola

a) Hřídel už byl zhruba navržen. Podle čl. 1.5.1 se kontroluje namáhání průřezu, průhyb a kritické otáčky.

b) Ložiska navrhujeme podle čl. 1.5.2.

c) Závěsná oka motorů s hmotností nad 30 kg navrhujeme podle ČSN 02 1369.

d) Výšku osy motoru a jeho hlavní montážní rozměry upravíme podle ČSN 35 0040, tab. 8a, 8b.

e) Konstrukce kostry musí respektovat požadovaná krytí podle ČSN 35 0001.

f) Po určení všech rozměrů a všech mechanických podmínek nakreslíme sestavu motoru, dílenské výkresy jeho částí a dílenský výkres vinutí; charakteristické údaje se zapíší do tabulkového formuláře, které má každý závod vlastní.

g) Do dílenských výkresů je třeba vyznačit přípustné odchylky montážních rozměrů (ČSN 35 0049), stupně lícování a drsnost povrchu — (ON 35 0050).

3.2. NÁVRH KROUŽKOVÉHO MOTORU

Stator se navrhuje stejně jako u motoru nakrátko.

3.2.1. Rotorové napětí

Podle starších norem je rotorové napětí mezi kroužky zabrzděného motoru dáno vztahem

$$U_r = 38 \sqrt{P} \pm 17 \% \quad [V; kW] \quad (280)$$

a z něho se podle druhu zapojení určí fázové napětí U_2 . Skoro výhradně je rotorové vinutí zapojeno do hvězdy.

Napětí se upraví až po návrhu vinutí.

3.2.2. Počet drážek na pól a fázi

Počet drážek na pól a fázi má být

$$q_2 = q_1 \pm 1 \quad (281)$$

a počet rotorových drážek

$$Q_2 = q_2 2p m \quad (282)$$

Určí se plný krok $Q_2/2p$ a jeho zkrácení.

3.2.3. Počet závitů v sérii

Počet závitů v sérii je dán převodem

$$N_{s2} = N_{s1} \frac{U_2}{U_1} \quad (283)$$

a tomu odpovídá počet vodičů v drážce

$$V_{d2} = \frac{2N_{s2}}{2pq_2} = \frac{N_{s2}}{pq_2} \quad (284)$$

Zaokrouhlí se na celé číslo, u dvouvrstvého vinutí dělitelné dvěma. Po určení počtu vodičů v drážce V_{d2} se upřesní ostatní veličiny

$$N_{s2} = q_2 p V_{d2} \quad (285)$$

$$U_2 = U_1 \frac{N_{s2}}{N_{s1}} \quad (286)$$

$$U_r = U_2 \sqrt{3} \quad (287)$$

3.2.4. Rotorový proud

Rotorový proud je určen převodem

$$I_2 = \kappa I_1 \frac{N_{s1}}{N_{s2}} \quad (288)$$

3.2.5. Průřez rotorového vinutí

Průřez rotorového vinutí určíme z proudové hustoty, která může být

$$\sigma_2 = (1,2 \text{ až } 1,25) \sigma_1 \quad (289)$$

takže

$$S_2 = \frac{I_2}{\sigma_2} \quad (290)$$

Rozměry pásu určíme až při návrhu drážky.

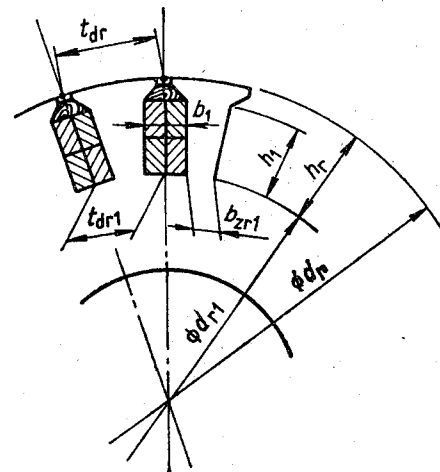
3.2.6. Rotorová drážka

Rotorová drážka u plochých pásů bývá tvaru D, F, M, N, jen malé motory s drátovým vinutím mohou mít drážku W.

Magnetická indukce v nejužším místě lichoběžníkového zuba může být

$$B_{zr1} = (1,8 \text{ až } 2,2) T$$

Jestliže by při určité hloubce drážky vycházela tato indukce velmi značná, měl by motor špatný účinnost. V takovém případě je třeba zvětšit délku železa, a tím se zmenší magnetická indukce v zubu.



Obr. 83. Rotorové drážky kroužkového motoru

Šířka zuba v nejužším místě (obr. 83) je

$$b_{zr1} = \kappa_1 t_{dr} \frac{B_\delta}{k_{Fe} B_{zr1}} \quad (291)$$

kde rozteč rotorových drážek je

$$t_{dr} = \frac{\pi d_r}{Q_2}$$

Při celkové hloubce drážky h_r je drážková rozteč u dna

$$t_{dr1} = \frac{\pi d_{r1}}{Q_2} = t_{dr} \frac{d_{r1}}{d_r} = t_{dr} \frac{d_r - 2h_r}{d_r} \quad (293)$$

a šířka drážky

$$b_1 = t_{dr1} - b_{zr1} \quad (294)$$

Tato předběžná šířka se potom upraví tak, aby při použité izolaci a potřebné vůli mezi vodiči bylo možné do drážky vložit daný počet plochých vodičů a aby přitom drážka vyhovovala příslušné normě. Návrh je nutné upravovat tak dlouho, dokud nejsou všechny podmínky uspokojivě splněny.

Pro první, alespoň předběžné určení rozměrů drážky předpokládáme, že je stejně hluboká jako drážka statorová.

Drážková a mezivrstevná izolace se volí podobně jako u statoru.

Z rozměru b_1 se odečtením dvou tloušťek drážkové izolace stanoví volná šířka drážky.

Uspořádání vodičů a jejich rozměry se určují zkusmo. Například při uspořádání vodičů podle obr. 83 určíme z volné šířky drážky za pomoci tabulek pásů (tab. 3, 4a, 4b) vhodnou menší normalizovanou šířku b . Potřebná tloušťka musí být

$$t = \frac{S_2}{b} \quad (295)$$

a zaokrouhlí se na normalizovaný rozměr.

Z tabulek 3 a 4 se určí skutečný průřez S_2 a izolační přírůstek. Z průřezu se pak kontroluje proudová hustota σ_2 .

Drážka se kreslí ve zvětšeném měřítku a upraví se podle ON 35 0868. Otevření drážky musí umožnit pohodlné vkládání vodičů daných rozměrů.

Ze skutečné šířky zubu se zpětně vypočítá magnetická indukce B_{zr1} , a jestliže vychází větší, zkontrolujeme magnetickou indukci v jedné třetině výšky od kořene zubu. Tato magnetická indukce nemá být větší než (1,6 až 1,7) T, jestliže má mít motor příznivý účinek.

Vychází-li indukce nepříznivě, je třeba změnit počet drážek nebo zmenšit průřez vodiče za současné kontroly oteplení.

3.2.7. Kroužky rotoru

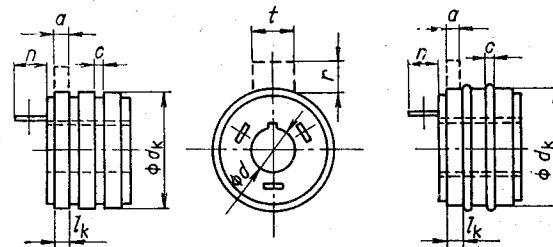
Kroužky mají podle ČSN 35 0855 normalizované průměry d_k [mm] (obr. 84):

6	7	8	10	12	16	20	25	32	40	50
63	80	100	125	140	160	180	200	220	250	280
315	355	400	450	500	560	630	710	800	900	1000

a šířku l_k [mm]

4	5	6	7	8	10	12	14	16	20	25	32	40	50
---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Podrobné rozměry jsou v rozměrových normách jednotlivých typů. Vhodný průměr se volí podle velikosti stroje a má být, vzhledem ke ztrátám způsobeným třením, co nejmenší. Velké kroužky je třeba kontrolovat na namáhání odstředivou silou.



Obr. 84.
Rozměrový náčrtek kroužků a kartáčů

3.2.8. Kartáče

Kartáče mají rozměry (obr. 84) $t \times a \times r$ [mm] z normalizované řady podle ČSN 35 0820:

2,5—3,2—4—5—6,3—8—10—12,5—16—20—25—32—40—50—63 mm

Kombinace rozměrů jsou uvedeny v ČSN 35 0821. Podle katalogu výrobce (Elektrokarbon, n. p. Topolčany) jsou doporučené jakosti kartáčů pro indukční stroje:

K 11 pro stroje s odklápěčem kartáčů, proudová hustota 18 A/cm², tlak 0,022 MPa, úbytek napětí 0,4 V

K 32 pro motory obecně, proudová hustota 16 A/cm², tlak 0,032 MPa, úbytek napětí 0,9 V

Průřez jednoho kartáče musí být minimálně

$$S_{k1} = \frac{I_2}{n_k \sigma_k}$$

kde σ_k je proudová hustota udaná výrobcem,
 n_k počet kartáčů na stroji.

Obyčejně bývá $n_k = 2$ a více.

3.2.9. Držáky kartáčů

Pro indukční stroje bývají typu Kp (s jedním ramenem), nebo častěji pro větší bezpečnost typu Kpd (se dvěma rameny). Jejich rozměry jsou v ČSN 35 0835.

3.2.10. Klín rotorové drážky

Tento klín má rozměry určené vlastně navrženou rotorovou drážkou a kontroluje se na ohyb podle čl. 1.5.4.

3.2.11. Tvar rotorové cívky

Tvar rotorové cívky z profilového vodiče můžeme vykonstruovat graficky pomocí různých podnikových metod.

Z nakreslené šablony se určí skutečná délka středního závitu, potřebná pro výpočet odporu rotorového vinutí a vyložení čel cívek l_v , potřebné pro určení jejich chladicího povrchu.

3.2.12. Bandáž čel rotorového vinutí

Navrhuje se podle čl. 1.5.5.

3.2.13. Kontrola návrhu

Kontrola návrhu se dělá stejně jako u motoru s kotvou nakrátko. Záběrný moment v kruhovém diagramu už není rozhodující, neboť je možné ho rotorovým spouštěčem zvětšit.

3.2.14. Ztráty kroužkového motoru

Ztráty tohoto motoru jsou zvětšeny o:

a) přechodové ztráty

$$\Delta P_{jk} = 3\Delta UI_2 \quad [W; V, A] \quad (297)$$

kde ΔU je přechodový úbytek napětí daný jakostí kartáče.

b) ztráty třením kartáčů

$$\Delta P_{fk} = p_k n_k S_{k1} f_k v_k \quad [W; MPa, mm^2, m/s] \quad (298)$$

kde n_k je počet kartáčů,

S_{k1} průřez jednoho kartáče,

p_k tlak na kartáč, předepsaný výrobcem,

f_k součinitel tření, obvykle 0,15

v_k obvodová rychlost kroužků.

Má-li motor odklápeč kartáčů, pak tyto ztráty odpadají.

3.3. NÁVRH STEJNOSMĚRNÉHO STROJE

3.3.1. Základní údaje

Tak jako indukční stroje můžeme i stejnosměrný stroj navrhnout pro určitý výkon s různým poměrem základních rozměrů. Ani zde neexistuje univerzální návod s jednoznačným řešením. Úspěšný návrh je vázán na srovnání s už existujícími stroji a na rozsáhlé ověřovací zkoušky na zkušebně. Ovlivněn je opět požadavkem technologičnosti a respektováním výrobních možností závodu.

Zvláště obtížný je návrh stroje pro velký výkon, u něhož je třeba zabezpečit co nejdokonalější využití.

Pro návrh motorů je nutno znát:

mechanický výkon na hřídeli P ,

napětí U ,

otáčky n ,

způsob řízení otáček

a) při stálém momentu,

b) při stálém výkonu,

c) při $M \sim n^2$,

požadovaný záběrný moment M_z ,

moment maximální M_{max} ,

způsob buzení,

způsob zatěžování,

prostředí,

teplotu okolí,

tvar a krytí.

Pro návrh dynam je třeba znát:

výkon P na svorkách,
napětí U ,
rozsah řízení napětí,
otáčky n ,
způsob buzení,
druh zatížení,
prostředí,
teplotu okolí,
tvar a krytí.

3.3.2. Vnitřní výkon

Vnitřní výkon kotvy je:

u dynamu

$$P_i = P + \Delta P_b \quad [W] \quad (299)$$

neboť kryje výkon na svorkách a ztráty v budicím vinutí ΔP_b , u motoru předpokládáme, že polovina rozdílu mezi výkonem a příkonem se ztrácí při přeměně elektrické energie na mechanickou, takže

$$P_i = P + \frac{\Delta P}{2} \quad [W] \quad (300)$$

nebo po úpravě

$$\Delta P = \frac{P}{\eta} - P = \frac{1 - \eta}{\eta} P$$

$$P_i = P + \frac{1 - \eta}{2\eta} P = P \frac{1 + \eta}{2\eta} \quad (301)$$

Účinnost můžeme odhadnout z tab. 14, ve které jsou uvedeny údaje o našich posledních výrobcích.

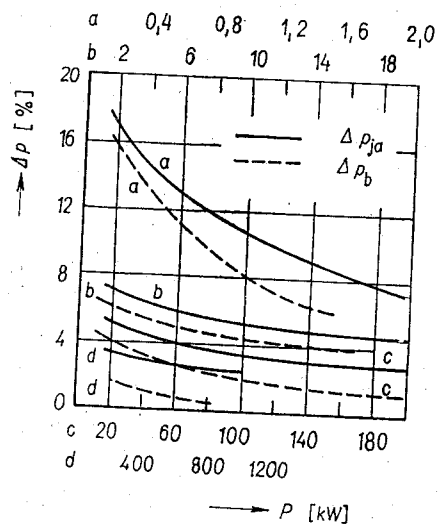
Ztráty v kotvě a budicím vinutí se určují z měrných ztrát v kotvě Δp_{ja} a v buzení Δp_b , které jsou v procentech výkonu vyneseny v diagramu na obr. 85.

Tabulka 14. Informativní účinnosti stejnosměrných strojů

Výkon kW	Motory pro n [ot/min]				Dynamu pro n [ot/min]			
	700	900	1 400	2 800	700	900	1 400	2 800
0,004	0,33							
0,045						0,33		
0,065					0,385			
0,070		0,435						
0,075	0,46				0,29			
0,120	0,53	0,53			0,46			
0,135			0,545			0,51		
0,15							0,58	
0,20		0,665						
0,22	0,60		0,62		0,555	0,56		0,63
0,25				0,61				
0,28							0,68	
0,35	0,66		0,72	0,64				0,66
0,50		0,705						
0,55	0,675		0,73					0,725
0,65				0,72		0,66		
0,80		0,725					0,75	
0,92	0,74		0,78			0,73		0,75
1,00				0,75			0,76	
1,30		0,775						
1,50			0,80					
1,65	0,775							
1,7				0,81				0,81
1,0						0,77		
2,2	0,785						0,81	
2,3		0,81						
2,6				0,83				0,82
3,1		0,815						0,84
3,4								
4,0	0,815		0,86					0,85
4,2				0,845				
5,0							0,87	
5,5		0,84	0,87					
5,8	0,84							
7,5						0,85		
7,8		0,855						0,88
8,0				0,885				
8,8							0,90	
9,2			0,88					0,92
11				0,89				0,92
18				0,905				
22							0,86	
25				0,91				0,92
36			0,88				0,87	
44							0,88	
51			0,885					

Tabulka 14 — pokračování 1

Výkon kW	Motory pro n [ot/min]				Dynamy pro n [ot/min]			
	700	900	1 400	2 800	700	900	1 400	2 800
62								
70								
80			0,89				0,885	
95							0,89	
105			0,90					
114			0,91				0,90	
140			0,92					
235							0,92	
290			0,92					
300			0,93				0,92	
400			0,93				0,93	



Obr. 85. Měrné ztráty v kotvě a v buzení stejnosměrných strojů

3.3.3. Jmenovitý proud

Jmenovitý proud je dán výkonem a napětím u dynamy

$$I = \frac{P}{U} \quad (302)$$

u motoru

$$I = \frac{P}{\eta U} \quad (303)$$

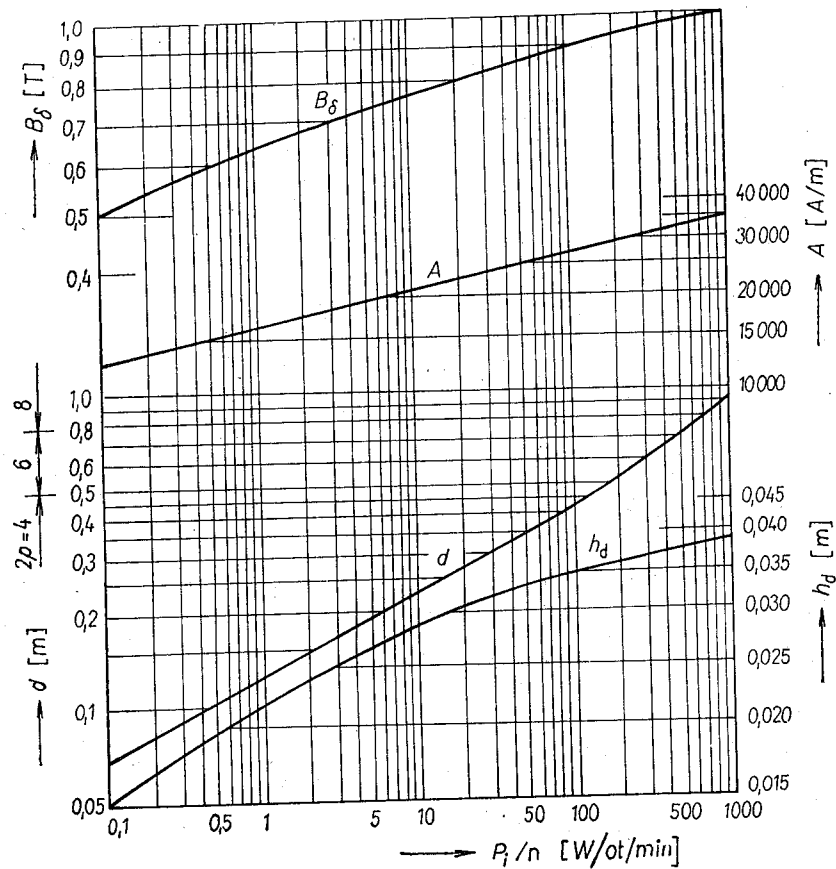
3.3.4. Proud kotvy

Proud kotvy je pro dynamo a derivační motor dán vztahem

$$I_a = \frac{P_1}{U} \quad (304a)$$

u sériového motoru

$$I_a = I \quad (304b)$$



Obr. 86. Základní rozměry stejnosměrných strojů podle Postnikova

3.3.5. Průměr kotvy

Průměr kotvy je vázán několika podmínkami; pro první návrh je možné ho volit podle obr. 86, ve kterém je společně s jinými základními údaji vyneseno v závislosti na měrném vnitřním výkonu P_1/n .

Při kontrole návrhu se potom podle potřeby pozmění.

Po volbě průměru se kontroluje obvodová rychlost

$$v = \frac{\pi d n}{60} \quad (305)$$

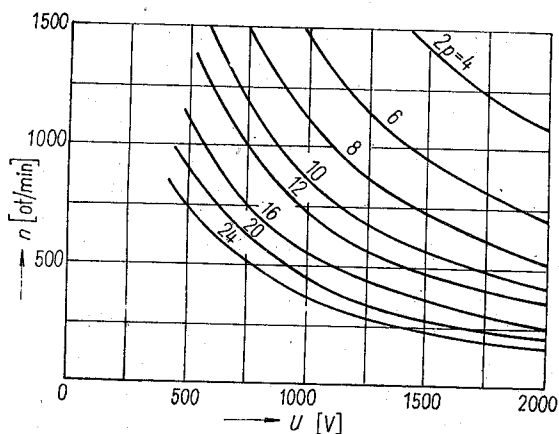
která nemá překročit meze

$$\text{pro } d < 0,3 \text{ m} \quad v < 15 \text{ m/s}$$

$$\text{pro } d > 0,3 \text{ m} \quad v > 25 \text{ m/s}$$

3.3.6. Počet pólů

Počet pólů se volí podle zkušenosti a je uveden na obr. 86. Kritériem pro správnou volbu počtu pólů je i diagram na obr. 87, ve kterém je správný počet pólů vyneseno v závislosti na otáčkách a napětí. Diagram předpokládá



Obr. 87. Maximální dovolený počet pólů v závislosti na otáčkách a napětí

maximální obvodovou rychlost komutátoru 40 m/s, lamelové napětí maximálně 18 V a průměrnou lamelovou rozteč 5 mm. Platí zvláště pro stroje větších výkonů.

3.3.7. Počet závitů v sérii

Počet závitů zapojených do série vychází z dovoleného obvodového proudového zatížení na povrchu kotvy A (z obr. 86).

Na kotvě je $2N_s 2a$ vodičů, kterými prochází proud

$$I_v = \frac{I_a}{2a}$$

takže

$$A = \frac{2N_s 2a \frac{I_a}{2a}}{\pi d} \quad (306)$$

a z toho vychází bez ohledu na použitý druh vinutí ($2a$)

$$N_s = \frac{\pi d A}{2I_a} \quad (307)$$

3.3.8. Počet drážek

Počet drážek volíme tak, aby drážková rozteč t_d byla asi 20 mm. Potom se upraví podle potřebného počtu lamel a druhu vinutí.

Přibližné počty drážek na pól mají být

$$Q_p = 7 \text{ drážek u strojů do 5 kW}$$

$$Q_p = 9 \text{ drážek u strojů do 50 kW}$$

$$Q_p = 12 \text{ až } 25 \text{ drážek u strojů nad 50 kW}$$

Pro předběžný odhad platí vztah

$$Q = \frac{\pi d}{t_d} \quad (308)$$

3.3.9. Počet lamel

Počet lamel je dán dovolenou hodnotou středního lamelového napětí, které může být

$$U_1 < 18 \text{ V u strojů nekompenzovaných}$$

$$U_1 < 20 \text{ V u strojů kompenzovaných}$$

$$K_{\min} = \frac{2pU}{U_1} \quad (309)$$

Tento přibližný počet se upraví podle druhu použitého vinutí.

3.3.10. Volba vinutí kotvy

Vlnové vinutí se volí pro menší stroje a stroje na vysoká napětí, smyčkové vinutí se volí pro velké stroje a nízká napětí.

Podle zkušeností můžeme při obvyklých otáčkách použít vlnového vinutí u strojů do výkonu

$$P = 250, 90, 25 \text{ kW} \\ \text{pro } U = 500, 220, 110 \text{ V}$$

Vlnové (sériové) vinutí je výhodné, neboť dává méně vodičů na kotvě a potřebuje tedy méně prostoru pro izolaci; stroj je lépe využit.

Drátové cívky se dají udělat do velikosti proudu $I_v = 30$ až 60 A , kruhové vodiče do 6 až 7 mm^2 .

Maximální proud v jedné drážce může být $1\,000$ až $1\,500 \text{ A}$.

V jedné vrstvě může být vedle sebe 1 až 7 vodičů, nad sebou nejvíce 2 až 4 ploché vodiče.

Počet drážek, lamel a cívkových stran v jedné vrstvě se upraví podle základních pravidel pro použitý druh vinutí.

3.3.11. Počet vodičů v drážce

Počet vodičů v drážce vypočteme ze vztahu

$$V_d = 2 \frac{2aN_s}{Q} \quad (310)$$

a zaokrouhlíme na celé, u dvouvrstvových vinutí na sudé číslo. Opravený počet závitů v sérii potom je

$$N_s = \frac{QV_d}{2 \cdot 2a} \quad (311)$$

Jestliže dáme do drážky ploché vodiče, jejich počet je třeba pozměnit tak, aby se daly souměrně uspořádat. Je-li větší rozdíl v počtu závitů N_s , musíme změnit v takovém případě i počet drážek

$$Q = \frac{2 \cdot 2aN_s}{V_d} \quad (312)$$

a až po zaokrouhlení počtu drážek Q opravit i počet závitů N_s .

Po všech úpravách zkontrolujeme skutečné obvodové proudové zatížení povrchu kotvy A .

3.3.12. Napětí indukované v kotvě

Napětí indukované v kotvě derivačního stroje vypočteme ze vztahu

$$U_1 = U \pm I_a R_a \quad (313)$$

a u sériového stroje

$$U_1 = U \pm I_a (R_a + R_{bs}) \quad (314)$$

znaménko $+$ platí pro dynamo a znaménko $-$ pro motory.

Odpor kotvy se určí z předpokládaných ztrát v kotvě ΔP_{ja}

$$R_a = \frac{\Delta P_{ja}}{I_a^2} \quad (315)$$

3.3.13. Magnetický tok pólu

Magnetický tok jednoho pólu vypočteme z rovnice pro napětí U_1

$$\Phi = \frac{U_1}{4fN_s} \quad (316)$$

kde kmitočet f indukovaného napětí je dán vztahem $f = pn/60$.

3.3.14. Efektivní délka železa (kotvy)

Tuto délku vypočteme z rovnice pro magnetický tok jednoho pólu

$$l_e = \frac{\Phi}{\alpha B \delta t_p} \quad (317)$$

kde maximální hodnotu magnetické indukce ve vzduchové mezeře volíme podle obr. 86.

Pólové krytí bývá

$\alpha = 0,65$ až $0,7$ u strojů s pomocnými póly (menší údaje při větším počtu pólů)

$\alpha = 0,7$ až $0,8$ u strojů bez pomocných pólů

Pólová rozteč

$$t_p = \frac{\pi d}{2p} \quad (318)$$

Vypočtená délka kotvy se kontroluje vzhledem k poměru délky železa a pólové rozteče, který má být

$$\frac{l_e}{t_p} = 1 \text{ až } 2$$

Jestliže vychází tento poměr nepříznivý, musíme změnit průměr kotvy.

3.3.15. Skutečná délka železa

Skutečná délka železa je

$$l = l_e + n_{vk} l'_{vk} \quad (319)$$

kde n_{vk} je počet ventilačních kanálů,
 l'_{vk} délka jednoho kanálu (obvyčejně 10 mm).

Je-li délka rotorů malá, pak se kanály nedělají.

3.3.16. Průřez vinutí kotvy

Průřez vinutí kotvy určíme z předpokládaných ztrát, tedy už z vypočteného odporu kotvy

$$S_a = \rho \frac{2(l + l_c) N_s}{2a R_a} \quad (320)$$

příčměž u dvouvrstvového vinutí délku čela odhadujeme na

$$l_c = 1,5 t_p \quad (321)$$

Tuto délku přesně stanovíme až po nakreslení dílenského výkresu cívký. Podniky mají pro tento účel vypracované podrobné grafy a empiricky zjištěné závislosti.

Podle vypočteného průřezu S_a volíme za pomoci tabulek vyráběných vodičů (tab. 2, 3, 4a, 4b) vhodný rozměr, jeho skutečný průřez a izolační přírůstek.

Kontrola proudové hustoty

$$\sigma_a = \frac{I_a}{2a S_a} \quad (322)$$

Obvykle bývá $\sigma_a = (3 \text{ až } 5) \text{ A/mm}^2$.

3.3.17. Návrh drážky

Při návrhu drážky vycházíme z drážkové rozteče a ze šířky zubu

$$b_z = t_d \frac{B_\delta}{B_z k_{Fe}} \quad (323)$$

kde činitel plnění železa je dán tab. 1 nebo

$k_{Fe} = 0,90$ pro plechy izolované hedvábným papírem,

$k_{Fe} = 0,93$ pro plechy stříkané lakem,

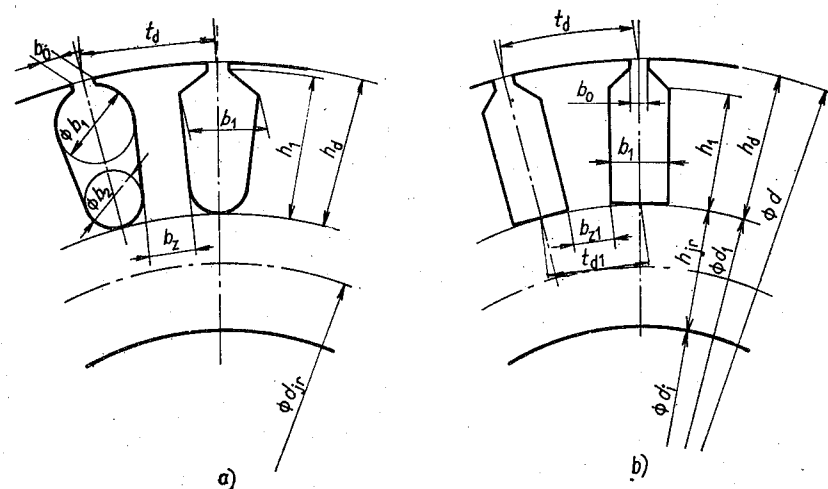
$k_{Fe} = 0,89$ až $0,99$ pro plechy fosfátované.

Zdánlivá magnetická indukce u kořene zubu nemá být v průměru větší než

$$B_z = (2 \text{ až } 2,4) \text{ T}$$

U rovnoběžných stěn bývá však i menší (1,7 až 1,75) T, u lichoběžníkových stěn až 2,6 T.

U lichoběžníkových drážek udává podle (323) b_z šířku rovnoběžného zubu (obr. 88a). Rozměry drážky určíme zkusmo zakreslením všech vodičů i s přiměřenou vůlí. Nejdříve nakreslíme normalizovaný uzávěr drážky b_1 , k , h_0 , b_0 , normalizovaný klín a vodiče nakreslíme mezi stěny vyložené zvolenou drážkovou izolací. Hloubka se zaokrouhlí na normalizovanou, a průměr b_2 dna drážky se vypočte z rovnic udaných v ČSN 35 0868 nebo se odměří z náčrtku.



Obr. 88. Hlavní rozměry drážek stejnosměrných strojů

U drážek s rovnoběžnými boky určíme rovnicí (323) šířku zubu u kořene b_{z1} (obr. 88b) a z ní vyplyne i předběžná šířka drážky

$$b_1 = t_{d1} - b_{z1} \quad (324)$$

jestliže drážková rozteč u kořene zubu je

$$t_{d1} = \frac{\pi d_1}{Q} = \frac{\pi(d - 2h_d)}{Q} \quad (325)$$

Celková hloubka drážky h_d pro první návrh je vyznačena v obr. 86.

Rozměry drážky a tím i rozměry zubu se upraví tak, aby se do něho dali souměrně uspořádat ploché vodiče žádaného průřezu. Rozměry vodiče se musí zkusmo určovat tak, aby se jimi drážka rovnoměrně vyplnila. Izolační přírůstek je v příslušných tabulkách a vůli mezi vodiči odhadneme (0,05 až 0,2 mm). Rozměry drážek jsou uvedeny v ON 35 0868 a rozměry klínů v ON 35 0935.

Izolace rotorového vinutí se skládá z izolace:

1. závitové,
2. cívkové (izolace cívkových stran a spojek),
3. drážkové.

1. *Závitová izolace* bývá:

dráty do průměru 0,5 mm — smalt, 2B, 2H,
nad průměr 0,5 mm — smalt, 2B, 2H, PB, B × B,
v třídě B — skelná páska,
pásky v třídě A — 2B, B × B, 2B × B,
pásky v třídě B — 2 × opředení skelnou přízí, azbest.

Tyčové vinutí můžeme zhotovit z holého vodiče, který se ovine slídou nebo skelnou páskou, případně se izoluje mikanitem, který se v páscích vloží mezi závity.

2. *Cívková izolace* bývá:

v rovné části se cívka izoluje u menších strojů:
ovinutím bavlněnou páskou (0,2 až 0,4 mm),
fermezovým plátnem (0,15 až 0,4 mm),
lesklou lepenkou (0,15 až 0,3 mm),
při izolaci B: slídovou páskou, ožehlení mikafóliem (0,8 až 2 mm podle napětí).

Cívková izolace vyčnívá z rotorového svazku o přesah závislý na napětí.

3. *Drážková izolace* je obvykle stejně jako u indukčních strojů složena ze tří vrstev. Nejjakostnější vrstva se dává doprostřed:

třída A: do 220 V — lepenka + olejové plátno + lepenka (0,6 mm),
do 800 V — lepenka + trubička z mikanitu nebo mikafólia nahřehlená přímo na cívku (drážka se lepenkou jen vy-
lepí),

třída B: leatheroid, skleněné vlákno, slídový papír.

Na dno drážky, pod klín a mezi cívkové plochy se dávají pásky z lesklé lepenky tloušťky 0,5 až 2 mm.

3.3.18. Jho rotoru

Magnetická indukce zde bývá $B_{jr} = (1,25 \text{ až } 1,6) T$, menší údaje platí pro stroje s komutačními póly. Výška jha je

$$h_{jr} = \frac{\Phi}{2B_{jr}l_e k_{Fe}} \quad (326)$$

přitom se napřed navrhne průměr hřídele pod plechy d_h (čl. 3.1.2 odst. 27) a výška jha je potom

$$h_{jr} = \frac{d - 2h_d - d_h}{2} \quad (327)$$

Z upravené výšky jha určíme skutečnou magnetickou indukci B_{jr} přepočítáním z (326).

3.3.19. Vzduchová mezera

Pod hlavním pólem musí být vzduchová mezera dost velká, aby reakce kotvy pod okrajem pólu nemohla obrátit směr magnetické indukce. Bývá asi

$$\delta = C \frac{t_p A}{B_\delta} \cdot 10^{-6} \quad (328)$$

kde $C = 0,65$ pro stroje bez komutačních pólů,
 $C = 0,50$ pro stroje s komutačními póly,
 $C = 0,40$ pro stroje s komutačními póly a kompenzačním vinutím,
 $C = 0,2$ až $0,3$ pro budiče se zářezy v pólech.

Minimálně může být

$$\delta = (0,01 \text{ až } 0,015) t_p \quad (329)$$

3.3.20. Jho hlavního pólu

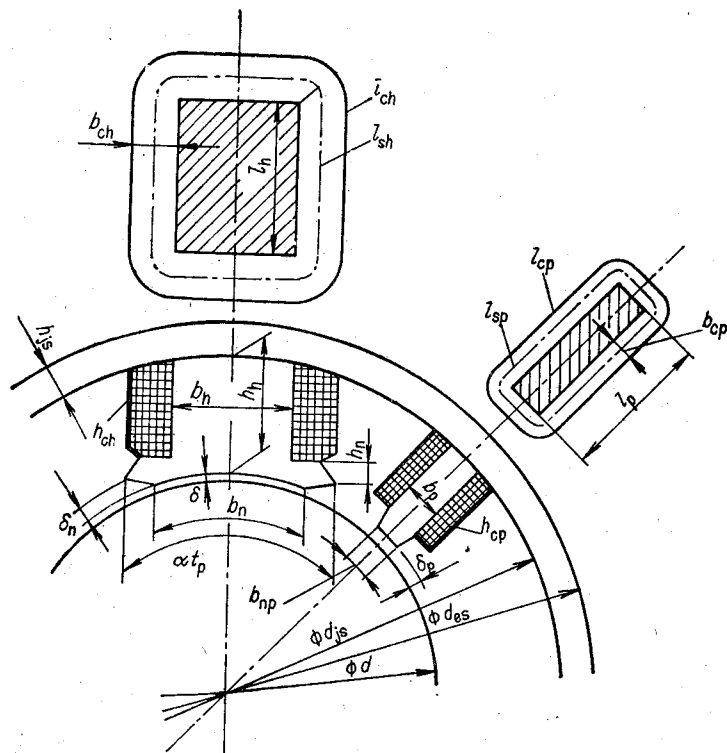
Jho se dimenzuje na magnetický tok zvětšený o rozptyl mezi póly. Činitel rozptylu bývá

$\tau = 0,15$ u strojů bez komutačních pólů
 $\tau = 0,25$ u strojů s komutačními póly

Šířka hlavního pólu je potom

$$b_h = \frac{(1 + \tau)\Phi}{B_h l_h} \quad (330)$$

kde $B_h = (1,2 \text{ až } 1,7) \text{ T}$ — pro plechové nebo ocelolitínové póly,
 l_h osová délka pólu (obvykle se rovná délce kotvy, jen u velkých strojů bývá o 10 až 20 mm kratší).



Obr. 89. Rozměry hlavního a pomocného pólu

Ostatní rozměry jsou podle obr. 89

$$b_n = (0,445 \text{ až } 0,5) t_p \quad (331)$$

$$\delta_n = (1 \text{ až } 2) \delta \quad (332)$$

Aby magnetický tok v pólovém nastavci nebyl zúžen, musí mít minimální výšku danou vztahem

$$h_n = 0,135b_n \quad (333)$$

Výška pólu je

$$h_n = \frac{d_{is} - d}{2} - \delta \quad (334)$$

kde d_{is} je vnitřní průměr statorové kostry a vychází z obvyklého poměru

	$\frac{d_{is}}{d} =$	2,0	1,8	1,7	1,6	1,4	1,3
pro	$2p =$	2	4	6	8	12	16

3.3.21. Jho statoru

Magnetická indukce ve jhu statorové kostry

$B_{js} = (1,0 \text{ až } 1,4) \text{ T}$ pro ocelolitínové kostry,
 $B_{js} = (0,5 \text{ až } 0,7) \text{ T}$ pro kostry ze šedé litiny.

Kostrou jde poloviční magnetický tok, zvětšený o rozptyl a předpokládáme, že se v ní rozloží na šířce větší o b_n než je délka pólu. Výška jha

$$h_{js} = \frac{(1 + \tau) \Phi}{2B_{js}(l_h + b_n)} \quad (335)$$

Vnější průměr kostry je

$$d_{es} = d_{is} + 2h_{js} \quad (336)$$

Po vhodném zaokrouhlení se zpětně určí skutečná výška jha ze vztahu (336) a jí odpovídající skutečná magnetická indukce

$$B_{js} = \frac{(1 + \tau) \Phi}{2h_{js}(l_h + b_n)} \quad (337)$$

3.3.22. Magnetomotorické napětí (buzení) pro jednu pólovou dvojici

Toto magnetomotorické napětí je dáno součtem magnetických napětí pro jednotlivé úseky magnetického obvodu (obr. 90)

$$F = U_\delta + U_z + U_{jr} + U_h + U_{js} \quad [\text{A}] \quad (338)$$

a) Pro vzduchovou mezeru

$$U_\delta = 1,6k_C \delta B_\delta \cdot 10^6 \quad [\text{A}; \text{m}, \text{T}] \quad (339)$$

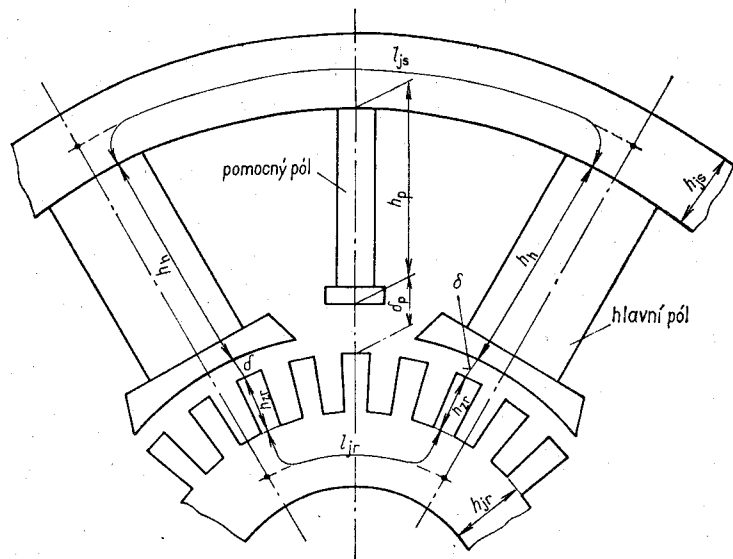
kde Carterův činitel (obr. 74) je

$$k_C = \frac{t_d}{t_d - \frac{b_0^2}{5\delta}} \quad (340)$$

b) Pro zuby rotoru

$$U_z = 2H_z l_z \quad [A; A/m, m] \quad (341)$$

příčemž H_z se určuje stejně jako u indukčního motoru (čl. 3.1.3.1).



Obr. 90. Magnetický obvod stejnosměrného stroje

U magnetických indukcií větších než 1,8 T je třeba určit skutečnou magnetickou indukcií v zubu, zmenšenou o část vytlačenou do prostoru drážky podle (192) a (193).

c) Pro jho rotoru

$$U_{jr} = H_{jr} l_{jr} \quad [A; A/m, m] \quad (342)$$

Za délku l_{jr} se bere pólová rozteč t_p , měřená uprostřed výšky rotorového jha (obr. 90)

$$l_{jr} = \frac{\pi(d_h + h_{jr})}{2p} \quad (343)$$

d) Pro hlavní póly

$$U_h = 2H_h h_h \quad [A; A/m, m] \quad (344)$$

e) Pro jho statoru

$$U_{js} = H_{js} l_{js} \quad [A; A/m, m] \quad (345)$$

Za délku l_{js} se bere pólová rozteč t_p , měřená uprostřed výšky statorového jha (obr. 90)

$$l_{js} = \frac{\pi(d_{is} + d_{es})}{2 \cdot 2p} \quad (346)$$

Poznámka. Intenzity magnetického pole čteme z magnetizační křivky (tab. 13) pro skutečné magnetické indukce, určené zpětně z konečných upravených rozměrů. Pro ocelolitinu můžeme pro menší magnetické indukce uvažovat hodnoty odpovídající dynamovým plechům Et 2,6/0,5 mm.

f) Celkové magnetomotorické napětí musí respektovat i vliv reakce kotvy, kterou odhadujeme asi na 5 %, takže

$$F = 1,05(U_\delta + U_z + U_{jr} + U_h + U_{js}) \quad [A] \quad (347)$$

3.3.23. Charakteristika naprázdno

Charakteristiku naprázdno potřebujeme pro návrh regulačních strojů (motorů i dynam). Sestrojujeme ji tak, že celkové magnetomotorické napětí se určí postupně pro 90, 100, 110 a 120 % magnetického toku (napětí). Přitom je třeba respektovat, že se změnou magnetického toku se lineárně mění jen magnetické napětí pro vzduchovou mezeru U_δ a příslušné magnetické indukce. Magnetická napětí pro cesty železem je třeba vždy znovu počítat podle intenzit magnetického pole, zjištěných z magnetizační křivky.

3.3.24. Budicí vinutí

Budicí vinutí navrhujeme tak, aby napětí kotvy mu dalo proud potřebný ke vzniku vypočteného magnetomotorického napětí F při dovoleném tepelném zatížení. Jednotlivé veličiny na sobě závisí.

a) Derivační a cizí buzení

Budicí vinutí má $2p$ cívek zapojených do série a připojených na napětí U vlastní kotvy nebo cizího zdroje.

Odpor celého obvodu

$$R_b = 2p\rho \frac{l_{sh}N_h}{S_b}$$

kde l_{sh} je střední délka závitu podle obr. 89, tzn.

$$l_{sh} = 2(l_h + b_h) + \pi b_{ch} \quad (348)$$

šířka cívky b_{ch} se při prvním návrhu odhadne.

Budicí proud

$$I_b = \frac{U}{R_b} = \frac{F}{2N_h}$$

a z toho je odpor

$$R_b = 2p\rho \frac{l_{sh}N_h}{S_b} = \frac{2UN_h}{F}$$

a po úpravě vychází

$$S_b = k\rho \frac{Fl_{sh}p}{U} \quad (349)$$

kde k je činitel zálohy v buzení,

$k = 1,25$ pro běžná dynama,

$k = 2,50$ pro dynama regulačních zařízení,

$k = 0,9$ až $1,0$ pro motory.

Proudovou hustotu určíme z předpokládaných ztrát

$$\begin{aligned} \Delta P_b &= 2p\rho \frac{l_{sh}N_h}{S_b} I_b^2 = \\ &= 2p\rho l_{sh}N_h I_b \sigma_b = 2p\rho l_{sh}N_h \frac{F}{2N_h} \sigma_b \end{aligned}$$

a z toho po úpravě vychází

$$\sigma_b = \frac{\Delta P_b}{p\rho l_{sh}F} \quad [A/mm^2; W, \Omega mm^2/m, m, A] \quad (350)$$

a budicí proud potom může být

$$I_b = \sigma_b S_b \quad (351)$$

a jemu odpovídá počet závitů na jednom pólu

$$N_h = \frac{F}{2I_b} \quad (352)$$

Ztráty v budicím vinutí musíme odvést chladicím povrchem cívek, tzn. $l_{ch}h_{ch}$. Podle obr. 89 je

$$l_{ch} = 2(l_h + b_h) + 2\pi b_{ch} \quad (353)$$

takže potřebná chladicí výška je minimálně

$$h_{ch} = \frac{\Delta P_b}{2p\rho l_{ch}\Delta\vartheta} \quad (354)$$

Činitel přestupu tepla α zjistíme z diagramu na obr. 6 pro rychlost

$$v_b = (0,3 \text{ až } 0,4) v \quad (355)$$

Do chladicí výšky cívky se podle obr. 89 počítají i volné čelní plochy, popřípadě povrch chladicích kanálů.

Oteplení jednotlivých částí stejnosměrných strojů podle ČSN 35 0000 je v tab. 6. Při výpočtu ale uvažujeme vzhledem k oteplení chladicího vzduchu a vnitřním spádům hodnotu o 15 K až 30 K menší.

Jestliže nedosáhneme vypočítané výšky chladicího povrchu na navrženém pólu, musíme povrch profilovat nebo udělat v cívce kanály. V krajním případě je třeba zvětšit i původní výšku pólu a tím i rozměry stroje. Jestliže to není možné, použijeme izolace s větší teplotní odolností.

b) Sériové buzení.

Navrhuje se pro plný proud stroje

$$I_b = I_a = I$$

takže

$$N_h = \frac{F}{2I} \quad (356)$$

Proudová hustota se určí z (350) a potřebný průřez je

$$S_b = \frac{I}{\sigma_b} \quad (357)$$

Vodič se určí z výrobních tabulek (tab. 2, 3, 4a, 4b).

3.3.25. Uspořádání budicího vinutí

Budicí vinutí řešíme současně s kreslením. Po nakreslení všech izolací vylpne z náčrtku volná výška cívky. Z ní určíme možný počet závitů v jedné vrstvě N_{p1} (výška dělená rozměrem izolovaného vodiče zvětšeného o vůli 0,05 až 0,2 mm).

Tomu odpovídá potřebný počet poloh

$$n_p = \frac{N_h}{N_{v1}} \quad (358)$$

a z tohoto počtu poloh určíme tloušťku cívky b_{ch} .

Uspořádání cívky je nutno upravovat tak dlouho, dokud příznivě nevyplní daný prostor při dodržení základních rozměrů. Z definitivního náčrtku určíme tloušťku cívky b_{ch} a chladičí výšku h_{ch} a z odměřených rozměrů vypočteme skutečnou střední délku závitu l_{sh} .

3.3.26. Pomocný pól

Vzduchová mezera pod pomocným pólem

$$\delta_p = 0,025 t_p \quad (359)$$

Doporučuje se, aby vzduchová mezera pod komutačním pólem byla větší než otevření drážky.

Magnetická indukce pod pomocným pólem je

$$B_{kp} = \xi A$$

kde jednotková rozptylová vodivost je

$$\xi = (4 \text{ až } 8) \cdot 10^{-6} \text{ H/m}$$

větší údaje patří hlubším drážkám.

Potřebné magnetické napětí

$$U_k = 1,6 B_{kp} \delta_p k_{ck} \cdot 10^6 \quad [\text{A}; \text{T}, \text{m}] \quad (360)$$

Carterův činitel k_{ck} se při poměrně velké vzduchové mezeře rovná jedné.

Magnetické napětí potřebné k potlačení reakce kotvy je u stroje bez kompenzačního vinutí

$$U_r = t_p A \quad (361)$$

Potřebný počet závitů pomocného pólu potom je

$$N_p = \frac{U_k + U_r}{2I_a} \quad (362)$$

Je třeba počítat se skutečným proudem kotvy, který bude jiný, než jsme na začátku návrhu předpokládali.

U derivačního stroje

$$I_a = I + I_b \quad (363)$$

(porovná se s počáteční odhadnutou hodnotou).

Hlavní rozměry pomocného pólu jsou vyznačeny na obr. 89. Šířka pólového nástavce bývá

$$b_{np} = 0,11 t_p \quad (364)$$

Mezera mezi okraji nástavců hlavního a pomocného pólu má být též asi b_{np} , aby se jejich magnetická pole neovlivňovala.

Magnetický tok pomocného pólu je vzhledem k velkému rozptylu

$$\Phi_k = (1 + \tau_p) B_{kp} b_{np} l_p \quad (365)$$

činitel rozptylu $\tau_p = 2$ až 3 , délka pólu se rovná délce kotvy, ale u velkých strojů bývá menší.

Při zvolené magnetické indukci B_{kp} (asi $1,2 \text{ T}$) je minimální šířka pomocného pólu

$$b_p = \frac{\Phi_p}{l_p B_{kp}} \quad (366)$$

Jestliže tato šířka vychází proti šířce nástavce velmi malá, můžeme pomocný pól zhotovit po celé délce se stejnou šířkou $b_p = b_{np}$.

Průřez pomocného vinutí vychází z podmínky

$$I_a^2 \varrho \frac{l_{sp} N_p}{S_p} = \alpha l_{cp} h_{cp} \Delta \vartheta \quad (367)$$

$$S_p = \frac{I_a^2 \varrho l_{sp} N_p}{\alpha l_{cp} h_{cp} \Delta \vartheta} \quad (368)$$

Pro první výpočet šířky cívky b_{cp} a chladičí výšku h_{cp} odhadneme.

Z vypočteného průřezu S_p určíme vyhovující rozměry vodiče a jeho skutečný průřez. Počet závitů v jedné poloze N_{v1} , počet poloh n_p a definitivní šířku cívky b_{cp} určíme podobně jako u hlavního pólu.

Na výkresu vinutí upravíme rozložení závitů tak, aby byl prostor dobře využit a chladičí kanály mezi vinutím byly dostatečné.

Z výkresu zjistíme rozměry: l_{sp} , l_{cp} , h_{cp} .

3.3.27. Komutátor

Průměr komutátoru

$$d_k = (0,5 \text{ až } 0,85) d \quad (369)$$

u dráhových motorů až $d_k = d$.

Tento průměr zaokrouhlíme na normalizovaný.

Pro lisované komutátory jsou průměry podle ON 35 0848

10	11	12	13	14	15	16	18	20	22	25	28
32	36	40	44	49	54	60	67	75	85	100	mm

Pro skládané komutátory jsou průměry podle ON 35 0846

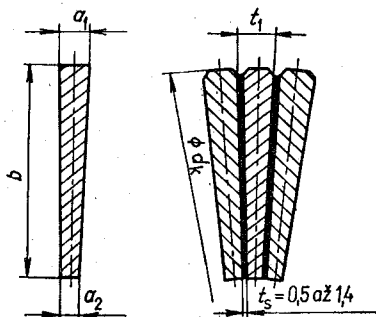
56	63	70	80	90	100	110	125	140	160
180	200	220	250	280	315	355	400	450	500
560	630	710	800	900	1 000	1 100	1 250	1 400	1 600
1 800	2 000	2 250	2 800	3 150	mm				

Průměr kontrolujeme podle obvodové rychlosti

$$v_k = \frac{\pi d_k n}{60} \quad (370)$$

pro $v_k \leq 30$ m/s stačí normální úprava,
 $v_k = 30$ až 45 m/s je nutno komutátor velmi pečlivě mechanicky kontrolovat na namáhání odstředivou silou,
 $v_k > 50$ m/s je nutno použít zděrový komutátor.

Přibližná výška lamely b je zřejmá z nakreslené konstrukce a upravíme ji tak, aby vyhověla rozměrům vyráběných profilů, které jsou uvedeny v katalogích výrobků. U větších výšek kontrolujeme namáhání způsobené odstředivou silou.



Obr. 91. Profil komutátorových lamel

Izolační vložky mezi lamelami volíme tak, aby po zpracování komutátoru měly tloušťku

d_k [mm]	tloušťka lamelové izolace t_s [mm]			
do 70	0,5	0,6		
od 70 do 500	0,7	0,8	1,0	
nad 500	0,7	0,8	1,0	2 x 0,7

Lamela má mít tloušťku minimálně 3,5 mm, u větších komutátorů 5 mm. Touto podmínkou a počtem lamel je vázán minimálně možný průměr komutátoru. Přibližná rozteč lamel má být (obr. 91)

$$t_1 = (a_1 + t_s) = \frac{\pi d_k}{K} \quad (371)$$

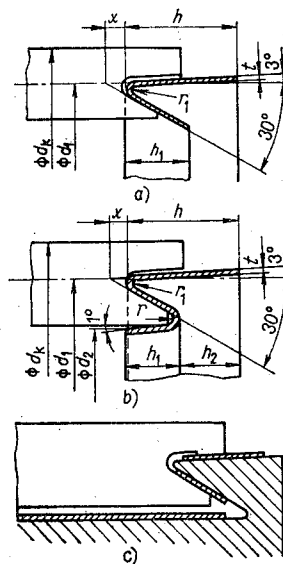
a z toho vhodná šířka lamely

$$a_1 = t_1 - t_s \quad (372)$$

Výpočet rozměrů profilu lamely je uveden v ON 35 0851. Komutátorové manžety (obr. 92) mají rozměry podle ON 35 0852. Šířku kartáče volíme podle druhu vinutí a bývá

$$t = (0,5 \text{ až } 1,5) a_1 \text{ u vlnového vinutí} \quad (373)$$

$$t = (1,5 \text{ až } 2,5) a_1 \text{ u smyčkového vinutí} \quad (374)$$



Obr. 92. Tvary mikanitových manžet:

- a) s jednoduchým ohybem, typ V,
- b) s dvojitým ohybem, typ W,
- c) náhrada manžet mikanitovými pásy

Rozměry kartáčů upravíme podle čl. 3.2.8 a podle ČSN 35 0821, popř. podle katalogu výrobce.

Celkovou délku jedné řady kartáčů stejné polaroty vypočteme z proudové hustoty, kterou předepisuje výrobce kartáčů. Průměrně bývá

$$\sigma_k = 0,1 \text{ A/mm}^2 \text{ při tlaku } 0,018 \text{ MPa}$$

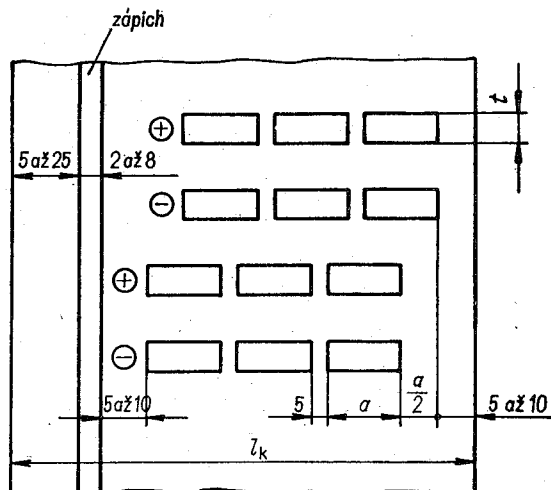
Jedna polarita má p řad kartáčů, takže délka jedné řady musí být

$$a_k = \frac{I_a}{pt\sigma_k} \quad (375)$$

Rozdělí se na určitý počet stejných kartáčů normalizovaných rozměrů tak, aby poměr rozměrů jednoho kartáče byl $a/t \approx 2$.

Katalog výrobce doporučuje pro stejnosměrné stroje tyto druhy kartáčů:

- D 5 pro malé stroje, $\sigma = 0,1 \text{ A/mm}^2$; $p = 0,0125$ až $0,016 \text{ MPa}$; $\Delta U_k = 3,8 \text{ V}$,
- G 3 pro stroje s menšími proudy, $\sigma = 0,06 \text{ A/mm}^2$; $p = 0,0175$ až $0,0200 \text{ MPa}$; $\Delta U_k = 4,0 \text{ V}$,
- EK 24 pro dynama do 220 V, $\sigma = 0,1 \text{ A/mm}^2$; $p = 0,0180 \text{ MPa}$; $\Delta U_k = 2,9 \text{ V}$,
- EK 67 pro trakční motory a budiče, $\sigma = 0,11 \text{ A/mm}^2$; $p = 0,0300 \text{ MPa}$; $\Delta U_k = 3,5 \text{ V}$.



Obr. 93. Určení délky komutátoru

Držáky kartáčů jsou obvykle typu Sp, jejich rozměry jsou v ČSN 35 0831.

Délka komutátoru l_k se určí z obr. 93. Vzhledem k oteplení komutátoru má být

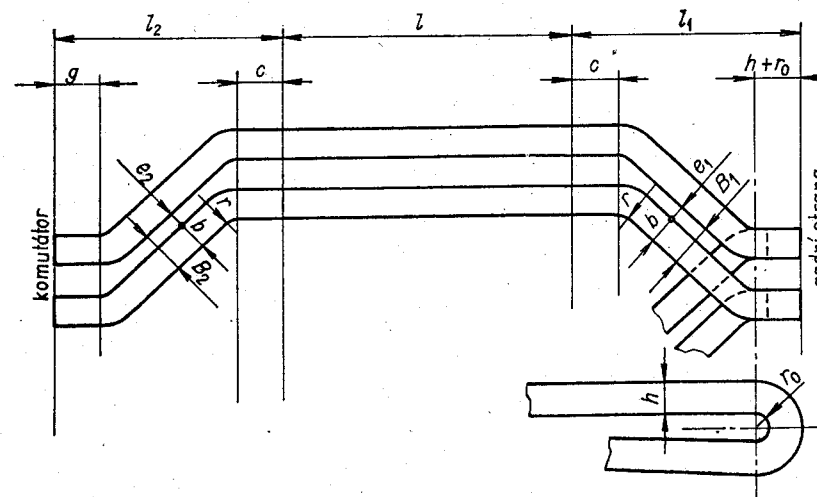
$$\frac{I_a}{\pi d_k l_k} \leq 2000 \text{ až } 5000 \text{ A/m}^2 \quad (376)$$

Na jeden roubík může připadnout nejvýše 1 000 až 1 200 A. Tato podmínka může vést u galvanizačních dynam k dodatečnému zvětšení počtu pólů.

Připojovací praporky mohou mít menší průřez než do nich zapojené vodiče, neboť jsou lépe chlazeny a neprochází jimi trvalý proud.

3.3.28. Vyložení čel vinutí kotvy

Vyložení čel vinutí kotvy můžeme určit různými graficko-početními metodami. Nejlépe, a poměrně jednoduše, ho můžeme určit podle [4].



Obr. 94. Vyložení čel stejnosměrného vinutí

Podle obr. 94 je

$$l_1 = c + h + r_0 + \frac{\frac{B_1 y_{d1}}{2} + \left(1 - \frac{B_1 Q}{\pi d_1}\right) (b + 2r)}{\sqrt{1 - \left(\frac{B_1 Q}{\pi d_1}\right)^2}} \quad (377)$$

$$l_2 = c + g + \frac{\frac{B_2 y_{d2}}{2} + \left(1 - \frac{B_2 Q}{\pi d_1}\right) \left(\frac{b}{2} + r\right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{B_2 Q}{\pi d_1}\right)^2}} \quad (378)$$

kde c je přesah rovné a izolované části cívky, který je závislý na napětí a bývá

$$c = 6 \quad 8 \quad 12 \quad 16 \quad 22 \quad 32 \text{ mm}$$

$$U = 150 \quad 400 \quad 700 \quad 1200 \quad 2000 \quad 3000 \text{ V}$$

r, r_0 poloměry ohybu vodičů, obvykle 3 až 5 mm

$$B_1 = b + e_1,$$

$$e_1 \geq 0,5 \text{ mm},$$

$$B_2 = b + e_2,$$

$$e_2 \geq 0,1 \text{ mm},$$

d_1 průměr u dna drážky,
 y_{d1} zadní krok drážkový,
 y_{d2} přední krok drážkový,
 g rovná část před zaústěním do komutátoru, obvykle 10 mm;
 u drátových cívek je vyložení samotného čela o g menší,
 připojení ke komutátoru se dělá jen volnými vodiči.

Z těchto údajů se nakreslí šablona na navíjení a z ní se určí střední délka závitu.

3.3.29. Ztráty

a) V kotvě (budou jiné, než se na začátku návrhu předpokládalo)

$$\Delta P_{ja} = I_a^2 \varrho \frac{2(l + l_c) N_s}{2a S_a} \quad (379)$$

b) v budicím vinutí

$$\Delta P_b = I_b^2 2p \varrho \frac{l_{sh} N_h}{S_b} \quad (380)$$

e) ve vinutí pomocných pólů

$$\Delta P_p = I_a^2 2p \varrho \frac{l_{sp} N_p}{S_p} \quad (381)$$

d) ztráty v železe kotvy jsou podobně jako ztráty v železe statoru indukčních strojů

$$\Delta P_{Fe} = \left[1,8 \frac{f}{50} + 3,3 \left(\frac{f}{50} \right)^2 \right] m_z B_z^2 +$$

$$+ \left[3 \frac{f}{50} + 2,5 \left(\frac{f}{50} \right)^2 \right] m_{jr} B_r^2 \quad (382)$$

Hmotnost zubů je

$$m_z = Q b_{zr} h_{zr} l_c k_{Fe} \gamma \quad [\text{kg}; \text{m}, \text{m}, \text{m}, \text{kg/m}^3] \quad (383)$$

a) hmotnost jha

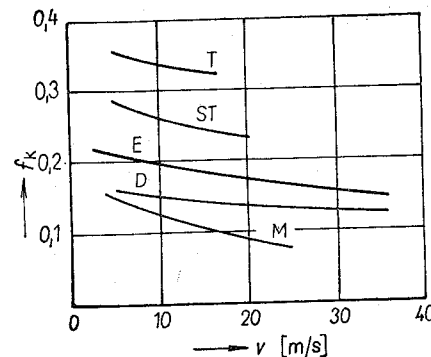
$$m_{jr} = \pi d_{jr} h_{jr} l_c k_{Fe} \gamma \quad [\text{kg}; \text{m}, \text{m}, \text{m}, \text{kg/m}^3] \quad (384)$$

e) ztráty způsobené třením kartáčů na komutátoru

$$\Delta P_{fk} = f_k p_k n_k a t v_k \quad [\text{W}; \text{MPa}, \text{mm}, \text{m/s}] \quad (385)$$

kde f_k je činitel tření, který závisí na rychlosti a druhu kartáčů podle obr. 95,

p_k měrný tlak kartáčů,
 n_k počet kartáčů na komutátoru,
 a, t rozměry kartáče,
 v_k obvodová rychlost komutátoru.



Obr. 95. Součinitel tření kartáčů:
 T — tvrdé, ST — polotvrdé, E — elektrografitové, D — grafitové, M — mědno-grafitové

f) ztráty průchodem proudu kartáči jsou

$$\Delta P_{jk} = 2 \Delta U_k I_a \quad [\text{W}] \quad (386)$$

kde U_k je úbytek napětí udaný výrobcem.

g) mechanické ztráty odhadneme podle vztahu

$$\Delta P_m = P^{0,9} \cdot \sqrt[4]{n} \quad [\text{W}; \text{kW}, \text{ot/min}] \quad (387)$$

h) dodatečné ztráty jsou podle ČSN 35 0015 u nekompensovaných strojů

$$\Delta P_d = 0,01 \cdot P_n \cdot 10^3 \quad [\text{W}; \text{kW}] \quad (388)$$

u kompenzovaných strojů

$$\Delta P_d = 0,05 \cdot P_n \cdot 10^3 \quad [\text{W}; \text{kW}] \quad (389)$$

i) celkové ztráty jsou

$$\Delta P = \Delta P_{ja} + \Delta P_b + \Delta P_p + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{fk} + \Delta P_{jk} + \Delta P_m + \Delta P_d \quad (390)$$

3.3.30. Účinnost

Účinnost určíme z procentních ztrát

$$\Delta p = \frac{\Delta P \cdot 100}{P + \Delta P} \quad [\%]; \text{ kW, kW, kW}] \quad (391)$$

ze kterých vychází účinnost

$$\eta = 100 - \Delta p \quad (392)$$

Tato účinnost se porovná s účinností odhadnutou na počátku výpočtu.

3.3.31. Oteplení

a) Hlavní póly. Oteplení se skládá z oteplení povrchu proti proudu chladicího vzduchu, z oteplení samotného proudu vzduchu při průchodu strojem a vnitřních teplotních spádů, které jsou větší u cívek větší tloušťky a odpadají u cívek z holých pásů vinutých na plocho

$$\Delta \vartheta_h = \frac{\Delta P_b}{2p h_{ch} l_{ch} \alpha} + \frac{\Delta P_b b_{ch}}{2p 2\lambda_n l_{sh} h_{ch}} + \Delta \vartheta_v \quad (393)$$

Součinitel přestupu tepla určíme z obr. 6 pro 30 až 40 % obvodové rychlosti kotvy, náhradní tepelná vodivost vnitřního cívkového prostoru je podle článku 1.4.8, obr. 13.

Tepelnou vodivost λ_1 pro použitou izolaci určíme z tab. 5b. Oteplení vzduchového proudu se počítá stejně jako u indukčního motoru nebo se odhadne

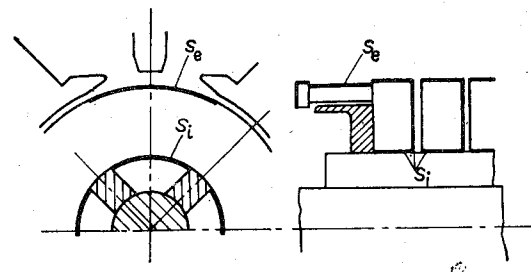
$$\Delta \vartheta_v = 12 \text{ K}$$

b) Pomocné póly. Oteplení se počítá ze ztrát ΔP_p stejně jako u hlavních pólů, tedy podle (393).

c) Oteplení kotvy je

$$\Delta \vartheta_a = \frac{\Delta P_{ja} + \Delta P_{Fe}}{\alpha_e S_e + \alpha_1 S_1} + \Delta \vartheta_v \quad (394)$$

kde S_e je součet vnějších chladicích ploch podle obr. 96,
 S_1 součet vnitřních chladicích ploch podle obr. 96,
 α_e součinitel přestupu tepla z obr. 6 pro 100 % obvodovou rychlost kotvy,
 α_1 součinitel přestupu tepla pro 10 % obvodové rychlosti kotvy (obr. 6).



Obr. 96.
Chladicí plochy kotvy

d) Oteplení komutátoru je

$$\Delta \vartheta_k = \frac{\Delta P_{fk} + \Delta P_{jk}}{\alpha_k S_k} + \Delta \vartheta_{vk} \quad (395)$$

$$\text{kde } \alpha_k = (20 \text{ až } 50) (1 + 0,7 \sqrt{v_k}) \quad [\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}; \text{ms}^{-1}] \quad (396)$$

a povrch komutátoru

$$S_k = \pi d_k l_k \quad (397)$$

oteplení vzduchu je

$$\Delta \vartheta_{vk} = 4 \text{ K, jestliže se nejdříve chladí komutátor a potom kotva,}$$

$$\Delta \vartheta_{vk} = 20 \text{ K, jestliže se nejdříve chladí kotva a potom komutátor.}$$

3.3.32. Ventilátor

Navrhujeme podle čl. 1.4.12, stejně jako u indukčního stroje.

3.3.33. Konstrukční části

Všechny konstrukční části (hřídele, ložiska, montážní rozměry, mezní úchytky a drsnost povrchu) řešíme podobně jako u indukčního stroje.

3.3.34. Sestava

Z navržených hodnot nakreslíme sestavu, dílenské detailní výkresy, dílenský výkres vinutí a tabulkový předpis.

3.4. NÁVRH SYNCHRONNÍHO STROJE

3.4.1. Základní údaje

Návrh synchronního stroje představuje nejchoulostivější oblast výpočtářské a konstrukční práce. Většinou jde o stroje velkých, až hraničních výkonů, které jsou velmi citlivé na správnou volbu jednotlivých parametrů. Navrhnout velký synchronní stroj je možné jen v těsném souladu s výrobními možnostmi výrobního závodu a při respektování všech novinek v oblasti izolace, chlazení apod. Konečný návrh vychází zpravidla z porovnání už vyrobených typů a je výsledkem kritického posuzování několika alternativních řešení. Přitom není poslední úlohou ani problém dopravy stroje na stanoviště.

Výrobní závody mají pro postup návrhu vypracovány vlastní směrnice, tabulky a výpočetní formuláře. Pro školní příklad je nejvýhodnější postup podle [2].

Při návrhu se vychází z těchto údajů:

Výkon P alternátoru [kVA, MVA],

P motoru [kW, MW],

počet pólů (otáčky),

napětí U ,

zapojení statorového vinutí,

u alternátoru minimální účinnk, při kterém se má stroj ještě nabudit na jmenovité napětí,

u motoru účinnk, na který má být motor za provozu vybuzen, tvar a krytí.

3.4.2. Určení hlavních rozměrů

Určení hlavních rozměrů synchronního stroje s vyjádřenými póly

1. Vnitřní úbytek napětí závisí na fázovém posunu a bývá

$$u = 0,12 \sin \varphi = 0,12 \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} \quad (398)$$

2. Vnitřní výkon

u alternátoru

$$P_1 = P(1 + u) \quad (399)$$

u motoru

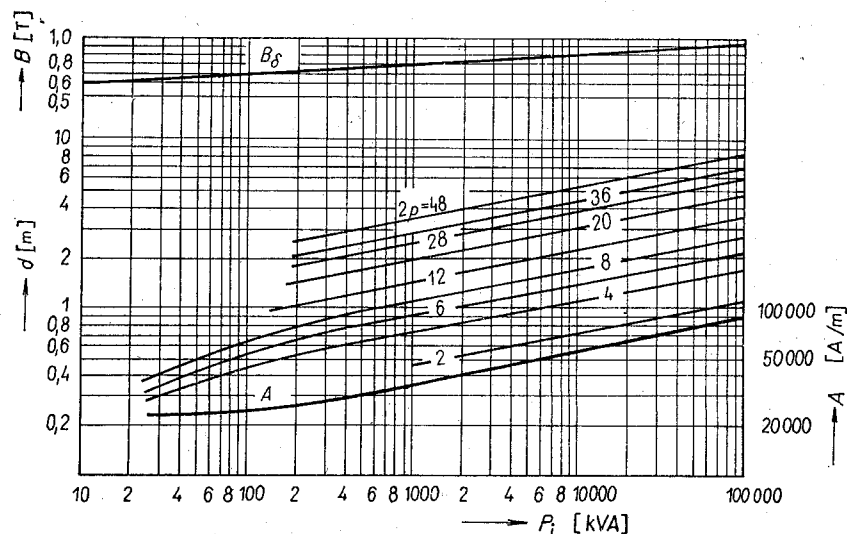
$$P_1 = \frac{P(1 - u)}{\eta \cos \varphi} \quad (400)$$

3. Fázový statorový proud

$$I_1 = \frac{P_1 \cdot 10^3}{3U_1} \quad [\text{A}; \text{kVA}, \text{V}] \quad (401)$$

kde U_1 je fázové napětí podle zapojení.

4. Vrtání statoru d a obvodové proudové zatížení povrchu železa zjistíme ze závislosti na vnitřním výkonu P_1 z diagramu na obr. 97.



Obr. 97. Základní parametry synchronních strojů v závislosti na vnitřním výkonu

Pólová rozteč je potom

$$t_p = \frac{\pi d}{2p} \quad (402)$$

5. Počet závitů zapojených v sérii pro jednu fázi

$$N_{s1} = \frac{\pi d A}{6 I_1} \quad [-; \text{m}, \text{A/m}, \text{A}] \quad (403)$$

6. Počet drážek na pól a fázi q volíme tak, aby drážková rozteč byla 25 až 65 mm. S ohledem na sinusový průběh indukovaného napětí má být co největší a u menších strojů bývá zpravidla zlomkový. Možný zlomkový počet drážek na pól a fázi je vázán potřebným počtem paralelních

větví 2a. U obvyklého dvouvrstvového vinutí platí

$$q = \frac{ca}{pq} \quad (404)$$

kde c je libovolné celé číslo.

7. Vinutí navrhujeme podle čl. 2.2. Zvýšenou pozornost je třeba věnovat zkrácení kroku. U celého počtu drážek na pól a fázi se má krok zkrátit asi na $(2/3) t_p$. U zlomkového počtu drážek na pól a fázi se vhodné zkrácení určí tak, že se vypočte činitel vinutí páté, sedmé a jedenácté harmonické pro různé zkrácení kroku a vybere se takové zkrácení kroku, u kterého je činitel vinutí páté harmonické nejmenší.

8. Počet vodičů v drážce pro 2a paralelních větví

$$V_{d1} = \frac{N_{s1}}{pq2a} \quad (405)$$

se zaokrouhlí na celé číslo a u dvouvrstvového vinutí na sudé číslo. Ze zaokrouhleného počtu se zpětně koriguje N_{s1} .

9. Tok jednoho pólu vyplývá ze zaokrouhleného počtu závitů N_{s1}

Pro alternátor

$$\Phi = \frac{(1+u)U}{fN_{s1}k_{v1}\pi\sqrt{2}} \quad [\text{Wb}; \text{—}, \text{V}, \text{Hz}, \text{—}, \text{—}] \quad (406)$$

pro motor

$$\Phi = \frac{(1-u)U}{fN_{s1}k_{v1}\pi\sqrt{2}} \quad (407)$$

Činitel vinutí k_{v1} určíme podle čl. 2.2.7.

10. Efektivní délka železa vychází z rovnice pro magnetický tok jednoho pólu

$$\Phi = \frac{2}{\pi} B_{\delta p} l_e \quad (408)$$

a je tedy

$$l_e = \frac{\pi\Phi}{2B_{\delta p}} \quad [\text{m}; \text{Wb}, \text{T}, \text{m}] \quad (409)$$

Při tom předpokládáme sinusový průběh magnetického toku, pro který je činitel tvaru $k_t = 2/\pi$.

11. Skutečná délka železa je

$$l = l_e + n_{vk} l'_{vk} \quad (410)$$

kde n_{vk} je počet ventilačních kanálů ve statoru,
 l'_{vk} šířka jednoho kanálu.

Počet ventilačních kanálů n_{vk} volíme tak, aby stator byl složen ze svazků o délce 38 až 60 mm.

12. Průřez statorového vodiče určíme z odhadnutých ztrát

$$\Delta P_{j1} = (0,8 \text{ až } 1,2) 75 P_i^{0,75} \quad [\text{W}; \text{kVA}] \quad (411)$$

Menší údaje platí pro rychloběžné stroje, větší pro stroje volnoběžné. Ztrátám odpovídá odpor

$$R_1 = \frac{\Delta P_{j1}}{3I_1^2} \quad (412)$$

ze kterého vychází možný průřez

$$S_1 = \frac{2q(l + l_{c1})}{2aR_1} \quad (413)$$

kde $2a$ je počet paralelních větví nebo počet paralelně vinutých vodičů,
 l_{c1} délka čela, odhadnuta podle Richtra

$$l_{c1} = 2y + 0,04U \quad [\text{m}; \text{m}, \text{kV}] \quad (414)$$

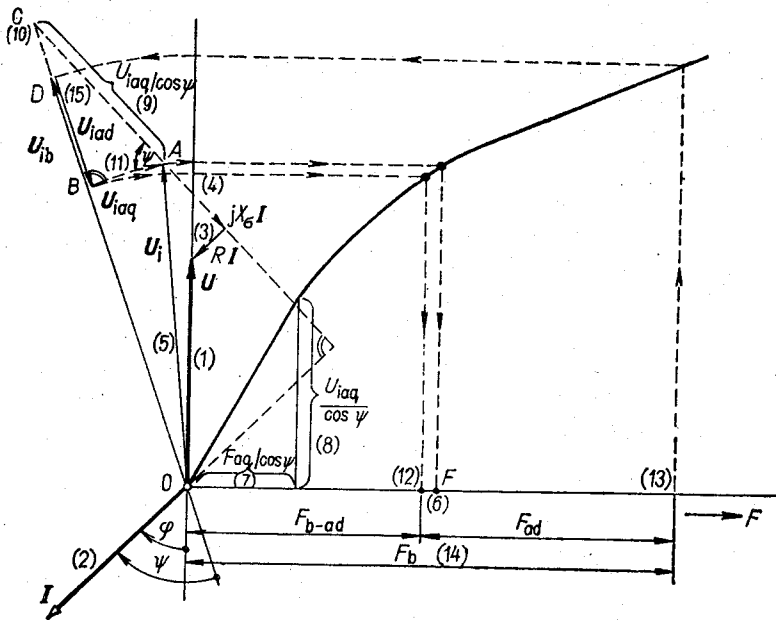
13. Statorovou drážku navrhujeme stejně jako u indukčního motoru. S ohledem na obvyklé pásové vodiče je drážka obdélníková s lichoběžníkovými zuby.

Magnetická indukce v nejužším místě zubu se volí $B_{zs} = (1,6 \text{ až } 1,8) \text{ T}$.
Tloušťka drážkové izolace závisí na napětí

1,5 mm do	2,5 kV
2,0 mm do	3 kV
3,0 mm do	6 kV
4,5 mm do	20 kV

14. Statorové jho navrhujeme podobně jako u indukčního motoru pro magnetickou indukci $B_{js} = 1,0 \text{ až } 1,4 \text{ T}$. U jakostnějších plechů může být magnetická indukce větší

$$h_{js} = \frac{\Phi}{2B_{js}l_e k_{Fe}} \quad (415)$$



Obr. 100. Určení buzení pro stroj s vyjádřenými póly

19. Odpor statorového vinutí R_1 určíme stejně jako u indukčního motoru.

20. Rozptylová reaktance synchronního stroje vzniká drážkovým rozptylem a rozptylem okolo čel stejně jako u indukčního motoru. Navíc s ohledem na velkou vzduchovou mezeru se uplatňuje rozptyl mezi zuby. Diferenční rozptyl neuvažujeme, neboť magnetické pole je sinusové

$$X_{\sigma} = \frac{4\pi f}{pq} N_{al}^2 (\Lambda_d + \Lambda_{\epsilon} + \Lambda_z) \quad (423)$$

kde Λ_d je magnetická vodivost drážkového rozptylu — počítá se podle tvaru drážky stejně jako u indukčního motoru,

Λ_{ϵ} magnetická vodivost rozptylu okolo čel — jako u indukčního motoru,

Λ_z magnetická vodivost prostoru mezi zuby

$$\Lambda_z = 0,4l_e \ln \left(1 + \frac{\pi b_z}{2b_d} \right) \cdot 10^{-6} \quad [\text{H}; \text{m}] \quad (424)$$

kde b_z je šířka zubu ve vzduchové mezeře,

b_d šířka drážky ve vzduchové mezeře.

21. Celkové magnetomotorické napětí F_b , na které je třeba stroj vybudit, určíme graficky z charakteristiky naprázdno (obr. 100), při respektování rozhodujícího vlivu reakce kotvy.

Podle prvního dílu je příčná složka reakčního magnetomotorického napětí (buzení)

$$F_{aq} = \kappa_q 2,7I_1 \frac{N_{s1}}{p} k_{v1} \cos \psi$$

Úhel ψ není na začátku návrhu znám, proto určíme jen průmět

$$\frac{F_{aq}}{\cos \psi} = \kappa_q 2,7I_1 \frac{N_{s1}}{p} k_{v1} \quad (425)$$

kde $\kappa_q = 0,3$.

Tomu odpovídá z charakteristiky průmět

$$\frac{U_{iaq}}{\cos \psi}$$

který vyneseme z bodu A na směr reaktančního úbytku napětí do bodu C. Spojnice OC udává směr \mathbf{U}_{ib} a kolmice z bodu A na tento směr určuje napětí U_{iaq} a současně určuje i velikost úhlu ψ .

Magnetomotorické napětí potřebné k vybudení napětí U_{iad} a krytí příčné složky reakce ($\overline{OB} = \mathbf{U}_i - \mathbf{U}_{iaq}$) zjistíme z charakteristiky naprázdno jako F_{b-ad} a k němu se aritmeticky připočítá podélná složka reakce (už při známém úhlu ψ)

$$F_{ad} = \kappa_d 2,7I_1 \frac{N_{s1}}{p} k_{v1} \sin \psi \quad [\text{A}] \quad (426)$$

kde $\kappa_d = 0,8$.

Celkové magnetomotorické napětí je potom

$$F_b = F_{b-ad} + F_{ad} \quad (427)$$

a tomu odpovídá napětí

$$U_{ib} = \overline{OD}$$

22. Poměrná změna napětí je

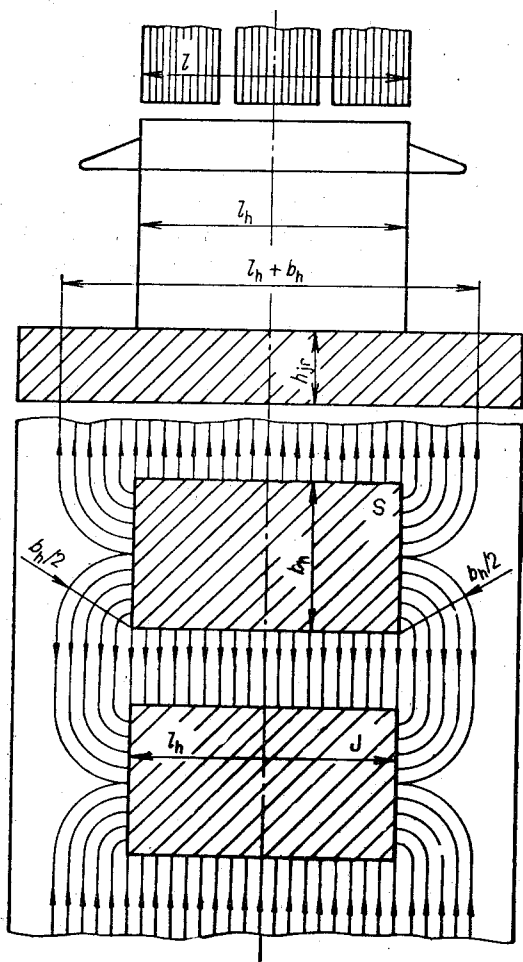
$$\varepsilon = \frac{U_{ib} - U}{U} \cdot 100 \quad [\%] \quad (428)$$

pro měkké stroje, vhodné pro práci v energetických sítích má být $\varepsilon = 10\%$ až 50% .

23. Hlavní pól dimenzujeme na magnetický tok zvětšený o rozptyl mezi póly, takže při zvolené magnetické indukci B_h je jeho průřez (obr. 101)

$$b_h l_h = \frac{(1 + \tau) \Phi}{B_h k_{Fe}} \quad (429)$$

kde číselník rozptylu odhadneme na $\tau = 0,1$ až $0,3$.



Obr. 101. Hlavní rozměry magnetického obvodu synchronního stroje

Číselník plnění železa je

$$k_{Fe} = 0,95$$

u pólů z plechu (plechy nejsou izolovány),

$$k_{Fe} = 1,0$$

u pólů z plného materiálu.

Délka pólu bývá stejná jako délka železa, nebo je o něco menší.

$$l_h \leq l \quad (430)$$

a potom šířka pólu b_h vyjde z rovnice (429).

24. Rotorové jho má mít při magnetické indukci B_{jr} výšku (obrázek 101)

$$h_{jr} = \frac{(1 + \tau) \Phi}{2(l_h + b_h) B_{jr}} \quad (431)$$

přičemž se předpokládá, že magnetický tok v jádře se podle obr. 101 rozloží na šířce $(l_h + b_h)$.

25. Pól a pólový nástavec mají tvar a rozměry podle obr. 99. Jen tehdy, má-li stroj tlumičiví vinutí, je třeba rozměry pólového nástavce upravit tak, aby se v něm daly tyče tlumiče pohodlně umístit.

26. Budičiví vinutí je třeba navrhout tak, aby jím při daném napětí budiče U_b procházel právě takový proud, který vybudí potřebný tok, a aby oteplení vinutí přitom nepřekročilo dovolenou mez.

Platí vztahy

$$I_b^2 R_b = \alpha_n \Delta \vartheta_h l_c h_c \quad (432)$$

$$I_b = S_2 \sigma_2 = \frac{U_b}{2p R_b} \quad (433)$$

$$F_b = 2 I_b N_h \quad (434)$$

$$R_b = \rho \frac{l_s N_h}{S_2} \quad (435)$$

kde R_b je odpor jedné cívky,

l_s délka středního závitu,

l_c chladičiví obvod cívky,

h_c chladičiví výška cívky (obr. 98) — podle už napřed odhadnuté výšky pólu,

U_b napětí budiče, podle ČSN 35 0200 je 65, 110, 220, 440 V

I_b budičiví proud,

N_h počet závitů budicí cívky,
 α_h činitel přestupu tepla, který je v závislosti na obvodové rychlosti pólu v_h dán vztahem

$$\alpha_h = 31v_h^{0,31} \quad [W \text{ m}^{-2}K^{-1}; \text{ms}^{-1}] \quad (436)$$

Řešením základních vztahů vychází

$$\sigma_2 = \frac{2\alpha_h \Delta\vartheta_h b_c}{\rho F_b} \quad [A/m^2] \quad (437)$$

$$S_2 = \frac{\rho p F_b l_s}{0,9 U_b} \quad [m^2] \quad (438)$$

$$I_b = S_2 \sigma_2 \quad (439a)$$

$$N_b = \frac{F_b}{2I_b} \quad (439b)$$

Přitom se za dovolené oteplení pólové cívky $\Delta\vartheta_h$ považuje oteplení uvedené v tab. 6, v prvním návrhu pro jistotu poněkud zmenšené.

V rovnici (438) počítáme s 10% zálohou v budicím napětí.

Aby se dal naznačený výpočet uskutečnit, musíme napřed odhadnout tloušťku cívky b_c (obr. 98) a potom délka středního závitu je

$$l_s = 2(b_h + l_h) + \pi b_c \quad (440)$$

a chladicí obvod cívky

$$l_c = 2(b_h + l_h) + 2\pi b_c \quad (441)$$

Budicí cívku navrhne nejlépe z plochých holých pásů podle obecných zásad, za současného kreslení jejího uspořádání.

27. Po návrhu budicího vinutí navrhne definitivně pól, pólový nastavec a rotorové jho.

28. Výpočet oteplení a kontrolu návrhu děláme v zásadě podobně jako u jiných točivých strojů.

V rámci kontroly vypočteme

ΔP_{j1} , ΔP_{j2} , ΔP_{Fe} (ve jhu a v zubech statoru), ΔP_m , ΔP_d , ΔP , η , $\Delta\vartheta_1$, $\Delta\vartheta_2$, $\Delta\vartheta_{Fe}$.

Zvlášť vypočítáme vodivost rozptylového prostoru mezi póly, velikost rozptylového toku a zkontrolujeme činitel rozptylu, který byl na začátku odhadnut.

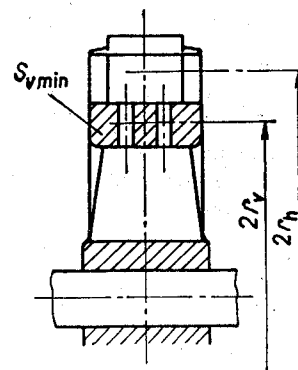
29. Mechanický návrh

29.1. Upevnění pólů se dimenzuje na odstředivou sílu při průběžných otáčkách, které musí zpravidla udat výrobce pohonného stroje. Vodní turbíny mívají průběžné otáčky až 350 % jmenovitých otáček. Jestliže nejsou průběžné otáčky udány, počítá se namáhání pro 180 % jmenovitých otáček.

Odstředivá síla působící na hmotnost pólu (i s vinutím) m_h na poloměru r_h (obr. 102).

$$F_h = m_h r_h \left(\frac{2\pi n_{\max}}{60} \right)^2 \quad [N; \text{kg}, \text{m}, \text{ot}/\text{min}] \quad (442)$$

a na tuto sílu dimenzujeme upevňovací šrouby nebo upevňovací rybiny.



Obr. 102. Rozměry magnetového věnce pro výpočet namáhání odstředivou silou

29.2. Na magnetový věnec hmoty m_v působí odstředivá síla všech pólů $2pF_h$ a vlastní odstředivá síla F_v

$$F_v = m_v r_v \left(\frac{2\pi n_{\max}}{60} \right)^2 \quad [N; \text{kg}, \text{m}, \text{ot}/\text{min}] \quad (443)$$

Průřez věnce S_v v nejslabším místě je namáhán napětím způsobeným odstředivými silami

$$\sigma = \frac{2pF_h + F_v}{2\pi S_v} \quad [MPa; N, \text{mm}^2] \quad (444)$$

Poznámka. Příklady návrhů točivých strojů budou uvedeny v samostatných svazcích jako grafické úlohy.

LITERATURA

- [1] *Artbauer J., Šedovič J., Adamec V.*: Izolanty a izolácie. ALFA, Bratislava 1969.
- [2] *Oigánek L.*: Stavba elektrických strojů. SNTL, Praha 1958.
- [3] *Líst V., Hak J. a kolektiv*: Technický průvodce. Elektrotechnika II. Elektrické stroje — část 1. SNTL, Praha 1969.
- [4] Věstník elektropromýšlenosti, 1958, č. 6, str. 68.

ING. RUDOLF MRAVEC

Elektrické stroje a přístroje

III. Navrhování elektrických strojů

DT 621.313.2(075.3)

621.313.32/.33(075.3)

Ze slovenského originálu Elektrické stroje a přístroje
vydaného n. p. Alfa, vydavatelstvo technickej
a ekonomickej literatúry, Hurbanovo nám. 3
815 89 Bratislava v roce 1975
přeložil a upravil doc. Ing. Vladimír Suchánek, ČS

Vydalo SNTL — Nakladatelství technické literatury, r.
Spálená 51, 113 02 Praha 1,
v roce 1986 jako svou 10 029. publikaci
Redakce elektrotechnické literatury
Odpovědný redaktor Ing. Rostislav Zeman
Vazbu navrhl Metoděj Sychra
Technická redaktorka Miroslava Kupková
Vytiskl ofsetem Tisk, knižní výroba, n. p., Brno, závod 1
240 stran, 102 obrázků, 14 tabulek
Typové číslo L25-C2-II-84/55747
Vydání třetí, nezměněné. Náklad 1000 prodejných výtisků
14,74 AA, 16,05 VA

05/34

Cena vázaného výtisku Kčs 19,—

507/23,856

*Publikace je určena zárukám 4. ročníků
středních průmyslových škol elektrotechnických
se silnoproudým zaměřením*

5551

04-521-86 Kčs 19,—

