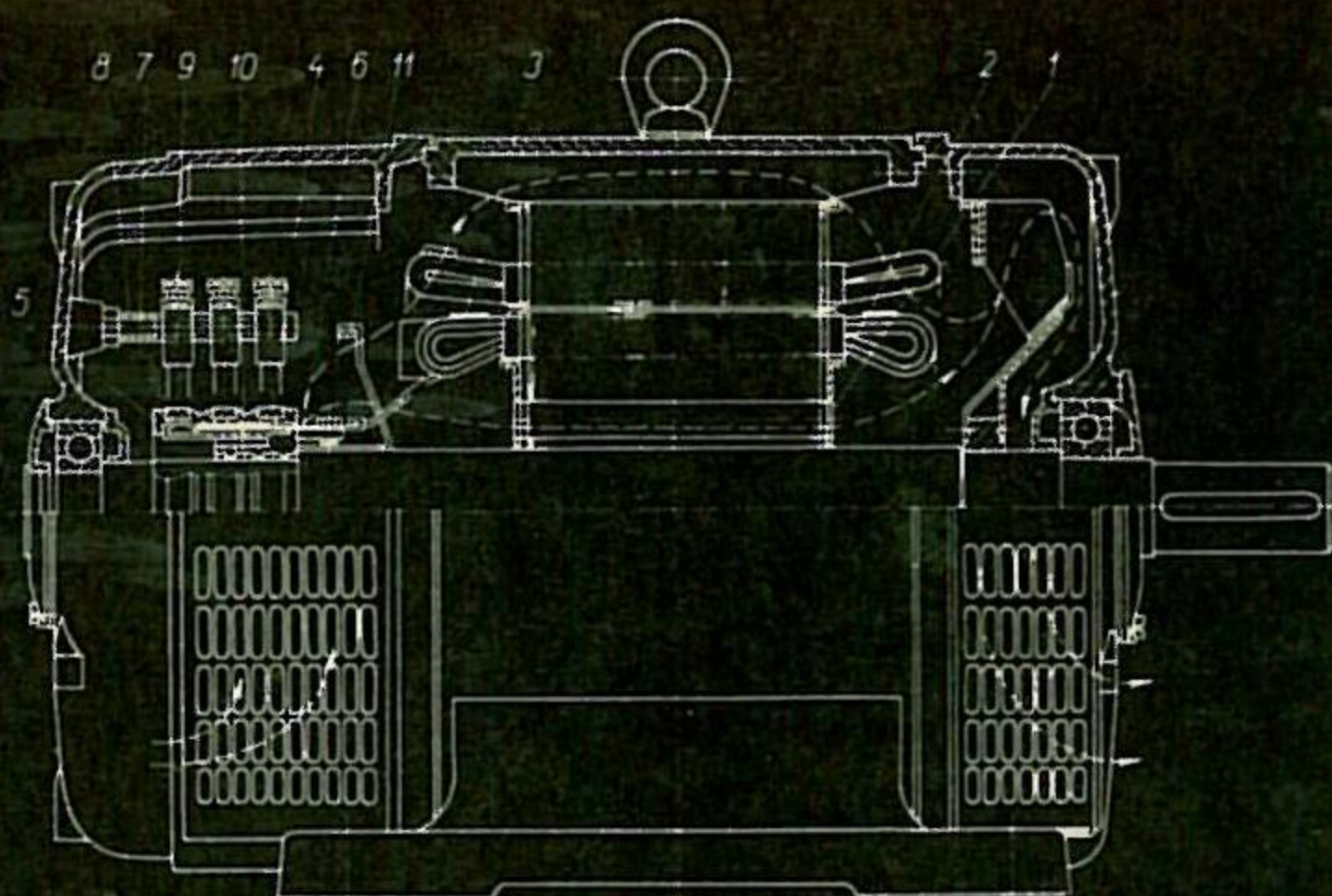


Elektrické stroje a přístroje

I. Elektrické stroje

RUDOLF MRAVEC

SNTL



ING. RUDOLF MRAVEC

ELEKTRICKÉ STROJE A PŘÍSTROJE

I. Elektrické stroje

*Schválilo ministerstvo školství České socialistické republiky
dne 31. května 1977, č. j. 16 025/77-211 jako učební text
pro III. ročník SPŠE studijního oboru 26-61-6 Zařízení
silnoproudé elektrotechniky.*

PRAHA 1979

**SNTL — NAKLADATELSTVÍ TECHNICKÉ
LITERATURY**

Publikace probírá teorii transformátorů, indukčních strojů, synchronních strojů, stejnosměrných strojů a komutátorových motorů na střídavý proud. Popsány jsou zde jejich provozní vlastnosti, charakteristiky, konstrukce a různá zapojení.

Kniha je určena žákům středních průmyslových škol elektrotechnických se silnoproudým zaměřením.

Redakce elektrotechnické literatury
Hlavní redaktor Ing. Adolf Klíček, CSc.
Odpovědný redaktor Ing. Josef Říha

© Ing. Rudolf Mravec, 1975

Translation © Doc. Ing. Vladimír Suchánek, CSc., 1979

OBSAH

ÚVOD	15
1. Základní úvahy a údaje o elektrických strojích	17
1.1. Rozdělení elektrických strojů	17
1.2. Krytí elektrických strojů	17
1.3. Třídy izolací	19
2. Transformátory	21
2.1. Základní pojmy	21
2.1.1. Definice a použití transformátorů	21
2.1.2. Popis jednofázového transformátoru	22
2.1.3. Popis trojfázového transformátoru	23
2.2. Rozdělení transformátorů	25
2.2.1. Podle počtu fází	25
2.2.2. Podle uspořádání magnetického obvodu	26
2.2.3. Podle uspořádání vinutí	26
2.3. Princip transformátoru	28
2.3.1. Schéma transformátoru s vyznačenými smysly okamžitých hodnot	28
2.3.2. Schéma se zakreslenými kladnými smysly	30
2.4. Velikost indukovaného napětí	31
2.5. Převod transformátoru	32
2.6. Ideální transformátor, vznik náhradního schématu	33
2.6.1. Zatížený transformátor	33
2.6.2. Přepočítání výstupních veličin na vstupní stranu	36
2.6.3. Náhradní schéma ideálního transformátoru	37
2.7. Skutečný transformátor naprázdno	38
2.7.1. Magnetizační proud	38
2.7.2. Ztrátový proud	39
2.7.3. Fázorový diagram	39
2.7.4. Výpočet magnetizačního proudu	40
2.7.5. Ztráty naprázdno	41
2.7.6. Hospodářský význam ztrát v železe	43
2.8. Transformátor při zatížení	43
2.8.1. Přepočítání odporů z výstupní strany na vstupní stranu	43
2.8.2. Rozptyl	43
2.8.3. Náhradní schéma a fázorový diagram skutečného transformátoru	50

2.9.	Transformátor při chodu nakrátko	51
2.9.1.	Definice a náhradní schéma	51
2.9.2.	Měření nakrátko	53
2.9.3.	Určení odporu a reaktance z měření nakrátko	55
2.9.4.	Složky napětí nakrátko	55
2.9.5.	Účinky proudu nakrátko	56
2.9.6.	Výpočet odporu vinutí	57
2.9.7.	Výpočet rozptylové reaktance vinutí	58
2.10.	Úbytek napětí	60
2.11.	Trojfázový transformátor	62
2.11.1.	Úprava magnetického obvodu	62
2.11.2.	Výpočet magnetizačního a ztrátového proudu	65
2.12.	Vinutí trojfázových transformátorů	65
2.12.1.	Způsoby kreslení	65
2.12.2.	Hodinový úhel	67
2.12.3.	Příklady různých zapojení	67
2.12.4.	Zapojení do lomené hvězdy	68
2.13.	Posouzení jednotlivých zapojení	69
2.13.1.	Zapojení Y_y	69
2.13.2.	Zapojení D_y	71
2.13.3.	Zapojení Y_d	71
2.13.4.	Zapojení D_d	71
2.13.5.	Zapojení Y_z	72
2.13.6.	Používaná zapojení	73
2.14.	Zvláštní zapojení	74
2.14.1.	Zapojení V	74
2.14.2.	Zapojení T	74
2.14.3.	Mnohofázová zapojení	76
2.15.	Paralelní chod transformátorů	76
2.15.1.	Význam a podmínky	76
2.15.2.	Rozdělení zatížení na paralelně zapojené transformátory	78
	a) Rozdělení zatížení při stejném napětí nakrátko	79
	b) Rozdělení zatížení při stejných jmenovitých výkonech	79
	c) Rozdělení zatížení při nestejných výkonech a při nestejných napětích nakrátko	80
2.16.	Řízení napětí transformátorů	81
2.16.1.	Význam	81
2.16.2.	Řízení napětí menších transformátorů	82
2.16.3.	Řízení napětí větších transformátorů	83
2.17.	Natáčivý transformátor	84
2.17.1.	Jednoduchý natáčivý transformátor	85
2.17.2.	Dvojitý natáčivý transformátor	86
2.18.	Účinnost transformátorů	87
2.19.	Autotransformátor	88

2.20.	Speciální transformátory	91
2.20.1.	Sběračové transformátory	91
2.20.2.	Rozptylové transformátory	92
2.20.3.	Svařovací transformátory	94
2.20.4.	Pecové transformátory	94
2.20.5.	Usměrňovačové transformátory	95
2.21.	Přístrojové transformátory	96
2.21.1.	Definice	96
2.21.2.	Chyby a vlastnosti	96
2.21.3.	Konstrukce přístrojových transformátorů napětí	100
2.21.4.	Konstrukce přístrojových transformátorů proudu	101
2.22.	Tlumivky	103
2.22.1.	Všeobecné údaje	103
2.22.2.	Určení reaktance tlumivky	105
2.22.3.	Rozdělení a použití tlumivek	106
2.22.4.	Reaktory	107
2.22.5.	Přesytky	108
2.23.	Konstrukce transformátorů	108
2.23.1.	Rozdělení transformátorů podle způsobu chlazení	108
2.23.2.	Vzduchové transformátory – A	109
2.23.3.	Olejové transformátory s přirozeným prouděním a přirozeným odvodem tepla z povrchu nádoby – ONAN	111
2.23.4.	Olejové transformátory s přirozeným prouděním a ofukováním – ONAF	113
2.23.5.	Olejové transformátory s nuceným oběhem oleje přes vodní chladič – OFWF	114
2.23.6.	Olejové transformátory s nuceným oběhem oleje přes ofukovaný chladič – OFAW	115
2.23.7.	Olejové transformátory s řízeným nuceným oběhem – OD	115
2.23.8.	Transformátory chlazené nehořlavými izolačními kapalinami – L	116
2.24.	Konstrukční detaily	116
2.24.1.	Magnetický obvod	116
2.24.2.	Konstrukce vinutí	122
	a) Vodiče a izolace	122
	b) Celkové uspořádání	123
	c) Vinutí nízkého napětí	123
	d) Vinutí vysokého napětí	125
	e) Vystřídání paralelních větví	127
	f) Ochrana před účinky přepětí	127
	g) Sestava vinutí	127
2.24.3.	Konstrukce nádoby	131
2.24.4.	Průchodky	133
2.24.5.	Dilatační nádoba	133
2.25.	Transformátorový olej	135
2.25.1.	Vlastnosti	135

2.26.	Návrh transformátoru	135
2.26.1.	Postup návrhu	136
2.26.2.	Kontrola návrhu	143
2.26.3.	Tepelný výpočet	146
2.26.4.	Mechanický výpočet	146
2.26.5.	Předpis vinutí	146
3.	Indukční stroje	147
3.1.	Základní pojmy	147
3.1.1.	Definice	147
3.1.2.	Rozdělení	147
3.1.3.	Popis trojfázového indukčního motoru s kotvou nakrátko	149
3.1.4.	Popis kroužkového motoru	150
3.2.	Základní vlastnosti indukčních motorů	151
3.2.1.	Vznik točivého magnetického pole	151
3.2.2.	Synchronní otáčky	156
3.2.3.	Vznik tažné síly	156
3.2.4.	Otáčky rotoru a skluz	157
3.3.	Trojfázové vinutí	159
3.3.1.	Základní pojmy a vztahy	159
3.3.2.	Rozdělení střídavých vinutí	162
3.3.3.	Jednovrstvová vinutí	163
	a) Soustředné vinutí – pólpárové, dvupolohové	163
	b) Soustředné vinutí – pólové, trojpolohové	165
	c) Rozložené vinutí se stejnými cívkami	166
3.3.4.	Dvouvrstvová vinutí	167
3.3.5.	Zlomková vinutí	168
3.4.	Napětí indukované ve vinutí	169
3.5.	Magnetický obvod	172
3.6.	Magnetizační proud	173
3.7.	Chod naprázdno	178
3.7.1.	Náhradní schéma a fázorový diagram	178
3.7.2.	Ztráty v železe	180
3.8.	Indukční motor při zatížení	180
3.8.1.	Náhradní schéma a fázorový diagram	180
3.8.2.	Zjednodušené náhradní schéma	185
3.8.3.	Moment indukčního motoru	187
3.9.	Chod nakrátko	189
3.9.1.	Náhradní schéma, proud nakrátko	189
3.9.2.	Měření nakrátko	191
3.10.	Odpor vinutí	192
3.11.	Rozptylová reaktance vinutí	196
3.12.	Činitel rozptylu	197
3.13.	Kruhový diagram	199

3.13.1.	Odvození	199
3.13.2.	Vyhodnocení kruhového diagramu	200
3.13.3.	Postup kreslení kruhového diagramu	205
3.14.	Vlastnosti indukčního motoru	206
3.14.1	Momentová charakteristika	206
3.14.2.	Přehled základních vlastností motoru	209
3.15.	Spouštění indukčních motorů	209
3.15.1.	Všeobecné zásady	209
3.15.2.	Úprava svorkovnice	210
3.15.3.	Přímé připojení k síti	211
3.15.4.	Přepínač hvězda – trojúhelník	212
3.15.5.	Spouštěcí transformátor	215
3.15.6.	Rozběhová spojka	215
3.15.7.	Odporová klec	215
3.15.8.	Dvojitá klec	216
3.15.9.	Vírová klec	217
3.16.	Kroužkový motor	219
3.16.1.	Popis a ovládání	219
3.16.2.	Průběh spouštění	221
3.16.3.	Určení spouštěcího odporu	222
3.17.	Řízení otáček indukčních motorů	222
3.17.1.	Základní vztah	222
3.17.2.	Řízení změnou kmitočtu	223
3.17.3.	Řízení změnou skluzu	223
3.17.4.	Přepínání počtu pólů	223
3.18.	Indukční generátor a brzda	226
3.18.1.	Indukční generátor	226
3.18.2.	Indukční brzda	228
3.19.	Jednofázový indukční motor	229
3.19.1.	Princip a vlastnosti	229
3.19.2.	Jednofázový indukční motor se stíněnými póly	234
3.20.	Indukční měnič kmitočtu	235
3.21.	Provedení indukčních strojů	236
3.22.	Konstrukce motorů s kotvou nakrátko	238
3.22.1.	Otevřený motor středního výkonu	238
3.22.2.	Otevřený motor s vírovou kotvou a svařovanou konstrukcí	240
3.23.	Konstrukce kroužkových motorů	242
3.23.1.	Otevřený kroužkový motor středního výkonu	242
3.23.2.	Velký kroužkový motor s odklápěčem kartáčů	244
3.24.	Zavřené motory	246
3.24.1.	Všeobecně	246
3.24.2.	Zavřený motor středního výkonu	247
3.24.3.	Nová řada československých zavřených motorů s kotvou nakrátko	248
3.24.4.	Zavřené motory s trubkovým chlazením	249

3.24.5.	Motory nevýbušného provedení	252
3.24.6.	Jeřábové motory	253
3.25.	Zvláštní konstrukce indukčních motorů	253
3.25.1.	Vmontované motory	253
3.25.2.	Tandemové motory	253
3.25.3.	Převodové motory	254
3.25.4.	Bubnové motory	254
3.25.5.	Brzdové motory	254
3.25.6.	Stopmotory	254
3.25.7.	Indukční spojka	254
3.25.8.	Lineární motor	257
4.	Synchronní stroje	258
4.1.	Základní pojmy	258
4.1.1.	Rozdělení a uspořádání synchronních strojů	258
4.2.	Napětí indukované ve vinutí	262
4.2.1.	Magnetické pole	262
4.2.2.	Velikost indukovaného napětí	263
4.2.3.	Magnetický obvod	264
4.3.	Provozní stavy	265
4.3.1.	Chod naprázdno	265
4.3.2.	Reakce kotvy	265
4.3.3.	Fázorový diagram zatíženého stroje	266
4.3.4.	Magnetomotorické napětí stroje s hladkým rotorem	270
4.3.5.	Zjednodušené náhradní schéma a fázorový diagram	271
4.3.6.	Synchronní stroj při stálém výkonu	274
4.3.7.	Synchronní stroj při stálém budícím proudu	275
4.3.8.	Reakce kotvy stroje s vyjádřenými póly	276
4.3.9.	Chod nakrátko	279
4.4.	Moment synchronního stroje	282
4.4.1.	Moment stroje s hladkým rotorem	282
4.4.2.	Moment stroje s vyjádřenými póly	284
4.5.	Řízení napětí	285
4.5.1.	Řízení napětí u strojů s budičem	285
4.5.2.	Buzení synchronních strojů napájené z neřízeného usměrňovače	288
4.5.3.	Buzení velkých alternátorů napájené z řízeného usměrňovače	289
4.6.	Provoz alternátorů	290
4.6.1.	Samostatně pracující alternátor	290
4.6.2.	Paralelní chod alternátorů	291
4.7.	Jednofázový alternátor	295
4.8.	Synchronní motor	295
4.8.1.	Vlastnosti	295
4.8.2.	Použití	297
4.8.3.	Autosynchronní rozběh	297

4.8.4.	Reakční synchronní motor	298
4.8.5.	Selsyny	300
4.8.6.	Krokové motorky	301
4.9.	Středofrekvenční alternátory	303
4.10.	Drápkové generátory	304
4.11.	Konstrukce synchronních strojů s vyjádřenými póly	307
4.11.1.	Všeobecné připomínky ke konstrukci	307
4.11.2.	Příklady konstrukce strojů s vyjádřenými póly	308
4.12.	Hydroalternátory	311
4.12.1.	Konstrukční požadavky	311
4.12.2.	Příklad konstrukce hydroalternátoru	313
4.13.	Turboalternátory	315
4.13.1.	Konstrukční požadavky	315
4.13.2.	Vzduchové chlazení	319
4.13.3.	Vodíkové chlazení	319
4.13.4.	Chlazení kapalinou	322
5.	Stejnoseměrné stroje	324
5.1.	Základní pojmy	324
5.1.1.	Popis stejnosměrného stroje	324
5.1.2.	Princip činnosti	326
5.2.	Působení komutátoru	328
5.2.1.	Působení komutátoru u dynama	328
5.2.2.	Působení komutátoru u motoru	328
5.3.	Stejnoseměrná vinutí	329
5.3.1.	Rozdělení	329
5.3.2.	Základní pojmy a vztahy	331
5.3.3.	Smyčkové (paralelní) vinutí	332
5.3.4.	Vlnové (sériové) vinutí	335
5.4.	Magnetický obvod stejnosměrného stroje	339
5.4.1.	Magnetické pole	339
5.4.2.	Napětí indukované ve vinutí	340
5.4.3.	Magnetomotorické napětí	341
5.4.4.	Charakteristika naprázdno	342
5.5.	Reakce kotvy	343
5.5.1.	Vznik reakce kotvy	343
5.5.2.	Vliv reakce kotvy	344
5.5.3.	Kompenzace reakce kotvy	346
5.6.	Komutace	347
5.6.1.	Základní vztahy	347
5.6.2.	Zlepšení komutace	351
5.6.3.	Podmínky dobré komutace	353
5.7.	Druhy stejnosměrných strojů	354
5.7.1.	Rozdělení	354

5.7.2.	Značky a schémata	355
5.8.	Dynama	356
5.8.1.	Základní pojmy a vztahy	356
5.8.2.	Dynamo s cizím buzením	357
5.8.3.	Derivační dynamo	358
5.8.4.	Sériové dynamo	363
5.8.5.	Kompaundní dynamo	364
5.9.	Stejnoseměrné motory	365
5.9.1.	Tažná síla a moment	365
5.9.2.	Otáčky motoru.	367
5.9.3.	Derivační motor	368
5.9.4.	Sériový motor	374
5.9.5.	Kompaundní motor	378
5.9.6.	Motor s cizím buzením	379
5.9.7.	Řízení tyristory.	382
5.10.	Unipolární stejnosměrné stroje	383
5.11.	Konstrukce stejnosměrných strojů	384
5.11.1.	Všeobecné úvahy	384
5.11.2.	Konstrukční detaily.	384
5.11.3.	Příklady zhotovených stejnosměrných strojů	387
	a) Jednotná řada stejnosměrných strojů	387
	b) Těžní motory	389
	c) Trakční motory	389
	d) Trakční generátory	393
6.	Komutátorové motory na střídavý proud	394
6.1.	Základní pojmy	394
6.1.1.	Význam a rozdělení.	394
6.1.2.	Tažná síla ve střídavém magnetickém poli	395
6.1.3.	Napětí indukované působením střídavého magnetického pole	398
6.1.4.	Komutace ve střídavém magnetickém poli	400
6.2.	Jednofázový sériový motor.	401
6.2.1.	Jednofázový sériový (univerzální) motorek	401
6.2.2.	Jednofázový sériový trakční motor	403
6.3.	Trojfázové komutátorové motory	404
6.3.1.	Trojfázový komutátorový motor napájený do statoru (Winter-Eichberg)	404
6.3.2.	Trojfázový komutátorový motor napájený do rotoru (Schrage)	412
6.3.3.	Použití trojfázových komutátorových motorů	415
6.4.	Konstrukce trojfázových komutátorových motorů	417
	REJSTŘÍK	423

PŘEDMLUVA

Směrnice pro hospodářský a sociální rozvoj ČSSR v údobí 6. pětiletého plánu ukládají mj. i prosazování kursu na těsnější zapojení československé ekonomiky do mezinárodní dělby práce. Jako příklad se uvádí zabezpečovat rozvoj ve výrobě, mj. i v jednotné řadě asynchronních motorů pro oblast zemí RVHP. Je třeba konstatovat, že tento úkol již byl řešen a jeho výsledky se promítají i v předkládané učebnici.

Znalosti o elektrických strojích získávají žáci SPŠE studijního oboru Zařízení silnoproudé elektrotechniky v předmětu „elektrické stroje a přístroje“. Předmět se ve III. ročníku vyučuje společně, ve IV. ročníku diferencovaně: ve skupině elektroenergetiky je volitelným maturitním předmětem, ve skupině elektrických strojů a přístrojů je maturitním předmětem povinným.

Dosavadní učebnice byly vědeckotechnickým rozvojem již překonány, což vedlo k úkolu zpracovat učebnici novou. Nejvhodnějším a nejrychlejším řešením se ukázalo přeložit učebnici Ing. Rudolfa Mravce, platnou v SSR. Tato učebnice totiž respektuje i nejnovější změny, k nimž došlo v elektrotechnické normalizaci právě se zřetelem ke stále těsnější ekonomické integraci a dělbě práce mezi státy RVHP.

Ve shodě s osnovou platnou pro III. ročník se v učebnici probírají základní úvahy o elektrických strojích, transformátory, indukční (asynchronní) stroje, synchronní stroje, stejnosměrné stroje a komutátorové stroje na střídavý proud.

Učivo navazuje na znalosti z předmětů „mechanika“, „základy elektrotechniky“, „elektrotechnologie“ a „části strojů a přístrojů“, které si žáci osvojili ve II. ročníku. Předpokládá ovšem náležité znalosti z matematiky, fyziky, technického kreslení a strojírenské technologie.

Spolu se souborem fázovaných transparentů Elektrické stroje a přístroje I. od Ing. Oldřicha Přadky (Komenium, n. p.) jsou dány předpoklady, aby bylo spolehlivě dosaženo cíle studia tohoto předmětu, tj. získání základní orientace ve fyzikálních principech, ve funkci a v technologičnosti konstrukce elektrických strojů.

Výzkumný ústav odborného školství

ÚVOD

Nová učebnice předmětu Elektrické stroje a přístroje pro žáky středních průmyslových škol elektrotechnických je zpracována podle učební osnovy D-05-1/10 a je rozdělena do tří dílů: První díl, Elektrické stroje pro III. ročník SPŠE, je určen společně pro obě volitelné skupiny.

Druhý díl bude věnován elektrickým přístrojům a ve třetím díle budou návrhy točivých elektrických strojů v rozsahu, který je úměrný úrovni průmyslových škol. Vzhledem k tomu, že tyto návrhy jsou probrány až ve třetím dílu učebnice, jsou v tomto dílu některé stati podány velmi stručně spíše popisně, aby to vyhovovalo i žákům elektroenergetické skupiny. Podrobněji jsou návrhy těchto strojů zpracovány až ve třetím dílu. Tak např. v prvním dílu jsou jen zkráceně uvedena vinutí elektrických strojů, výpočty buzení apod.

Schémata popisovaných strojů jsou kreslena tak, aby vyhovovala současným čs. normám a aby se žáci zároveň naučili stroj zapojit a uvést do chodu. Na základě jen zjednodušených naukových schémat se to nemusí vždy podařit.

V poslední době bylo u nás vydáno několik názvoslovných norem a učebnice se jim přizpůsobila. Proto jsou některé pojmy nové, nezvyklé a odlišné od dosud používaných. Zvláště výrazná je tato rozdílnost ve stati o transformátorech.

Pro zkrácení rozsahu jsou vynechány nebo jsou uvedeny jen stručně popisy konstrukčních detailů jednotlivých strojů. Počítá se s tím, že některé konstrukční detaily jsou probrány v předmětu „části elektrických strojů a přístrojů“ a v předmětu „elektrotechnologie“.

Do značných podrobností však jdou vzorové grafickopočetní úlohy, které žactvo dostává jako pomocné knihy.

Dnešní stav konstrukce elektrických strojů je poznamenán úpornou snahou o hospodárnou a efektivní výrobu, jakož i problémy vyvstávajícími tím, že výkony překračují hodnoty, které ještě nedávno byly považovány za výkony mezní.

Ukázky konstrukcí jednotlivých strojů jsou voleny tak, aby demonstrovaly celosvětový průměr, ale i postavení našich výrobků ve světě. Potěšitelné je, že nejednou jsou naše výrobky porovnatelné s vrcholnými výrobky zahraničními. Je tomu tak např. u nově vyvinutých motorů řady M4A a 3AP, která je výsledkem tvůrčí spolupráce našich a sovětských pracovišť.

1. ZÁKLADNÍ ÚVAHY A ÚDAJE O ELEKTRICKÝCH STROJÍCH

1.1. ROZDĚLENÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ

Elektrický stroj přeměňuje elektrickou energii působením elektromagnetické indukce.

Podle způsobu přeměny energie rozdělujeme elektrické stroje na:

1. Generátory, které mění mechanickou energii na energii elektrickou.

Generátory rozdělujeme dále na:

a) dynamy, tj. generátory vyrábějící stejnosměrný proud,

b) alternátory, tj. generátory vyrábějící střídavý proud.

2. Motory, které mění elektrickou energii na energii mechanickou.

3. Měníče, které mění jen druh elektrického proudu.

Podle druhu proudu jsou stroje na proud:

1. stejnosměrný,

2. střídavý jednofázový,

3. střídavý trojfázový.

Vzhledem ke konstrukci strojů je dělíme podle principu působení na:

1. transformátory,

2. indukční (asynchronní) stroje,

3. stejnosměrné stroje,

4. synchronní stroje,

5. střídavé stroje s komutátorem.

1.2. KRYTÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ

Krytím dosahujeme jistého stupně ochrany před nebezpečným dotykovým napětím a před vniknutím cizích předmětů a vody do stroje.

Podle ČSN 35 001 z roku 1971 se druh krytí označuje všeobecnou značkou IP a dvojčíslem, z něhož první číslo (0 až 6) vyjadřuje stupeň ochrany před nebezpečným dotykem a před vniknutím cizích předmětů k živým a pohyblivým částem, druhé číslo (0 až 8) vyjadřuje stupeň ochrany před vniknutím vody.

Přehled číselných označení je v tab. 1.

Stroje vnějšího provedení mají pro označení druhu krytí písmeno W, např. IP W 44.

U točivých strojů se údaj o krytí doplňuje i písmenem, označujícím chlazení.

Značky chlazení podle ČSN 35 0006 jsou:

- a přirozené chlazení, bez ventilátoru,
- b až i vlastní chlazení, ventilátor je poháněn hřídelem vlastního stroje,
- b1 až i1 cizí chlazení, ventilátor s cizím pohonem.

Význam značek je následující:

- a přirozené chlazení bez zvláštního ventilátoru,

Tabulka 1. Krytí elektrických strojů podle ČSN 35 0001 z roku 1971

První číslice ve značce krytí	Stupeň ochrany před nebezpečným dotykem	Stupeň ochrany před vniknutím cizích předmětů
* 0 × 1 × 2 × 3 × 4 × 5 × 6 ×	bez ochrany plochou částí těla, např. dlaní prstem nástrojem s průměrem nad 2,5 mm nástrojem s průměrem nad 1,0 mm jakoukoli pomůckou jakoukoli pomůckou	bez ochrany velkých malých drobných (rozměrů 2,5 až 12,5 mm) velmi drobných (rozměrů 1,0 až 2,5 mm) prachu částečně úplně
Druhá číslice ve značce krytí	Stupeň ochrany před vniknutím vody	
× 0 × 1 × 2 × 3 × 4 × 5 × 6 × 7 × 8	bez ochrany sražené kapající šikmo dopadající stříkající tryskající při zaplavení při ponoření tlakové (pod stanoveným tlakem)	

- b jednoduché chlazení, vzduch se nasává i vyfukuje do stejného prostředí,
- c chlazení s přívodem vzduchu; vzduch se do stroje přivádí zvláštním kanálem z jiného prostředí,
- d chlazení s odvodem vzduchu; vzduch se ze stroje odvádí kanálem do jiného prostředí,
- e s přívodem i odvodem vzduchu,
- f chlazení s oběhem vzduchu; vzduch nuceně obíhá strojem a chladíčem v uzavřeném obvodu,
- g povrchové chlazení; povrch uzavřeného stroje se chladí vzduchem, který na něj vhání ventilátor nasazený na hřídel zvenku,
- h chlazení kapalinou,
- i chlazení plynem.

Nejčastější provedení točivých strojů podle krytí a chlazení je:

- IP 21/b polokryté s jednoduchým vlastním chlazením,
- IP 21/b1 polokryté s cizím chlazením,
- IP 21/c polokryté s přívodem vzduchu,
- IP 21/c1 polokryté s cizím přívodem vzduchu,
- IP 23/b kryté s jednoduchým chlazením,
- IP 23/b1 kryté s jednoduchým cizím chlazením,
- IP 23/c kryté s přívodem vzduchu,
- IP 44/b zavřené s jednoduchým chlazením,
- IP 44/e zavřené s přívodem i odvodem vzduchu,
- IP 44/e1 zavřené s přívodem i odvodem vzduchu cizím ventilátorem
- IP 44/f zavřené s oběhem vzduchu,
- IP 44/f1 zavřené s oběhem vzduchu pomocí cizího ventilátoru,
- IP 44/g zavřené s vlastním povrchovým chlazením,
- IP 44/g1 zavřené s cizím povrchovým chlazením.

Sériově vyráběné motory jsou obvykle v provedení IP 21/b nebo IP 44/g.

1.3. TŘÍDY IZOLACÍ

Důležitým údajem o elektrických strojích je třída tepelné stálosti jejich izolace (III. díl této učebnice). Podle nejvyšší dovolené teploty se rozdělují izolanty do těchto tříd:

Y do teploty 90 °C

- A do teploty 105 °C
- E do teploty 120 °C
- B do teploty 130 °C
- F do teploty 155 °C
- H do teploty 180 °C
- C nad teplotu 180 °C

Třída izolace určuje dovolené oteplení stroje a tím podmiňuje i stupeň jeho využití.

2. TRANSFORMÁTORY

2.1. ZÁKLADNÍ POJMY

2.1.1. Definice a použití transformátorů

Transformátor je elektrický stroj, který se používá ke změně napětí střídavého proudu při stálém kmitočtu. Pracuje na principu elektromagnetické indukce, ale bez točivého pohybu.

K výrobě elektrické energie v alternátorech je vhodné napětí 6, 10, 15, nejvýše 25 kV. Pro přenos energie je však hospodárné mnohem vyšší napětí, tzn. 100, 200, 400 kV, ale i vyšší, podle vzdálenosti a velikosti přenášeného výkonu. Koordinaci těchto napětí zajišťují transformátory. Ve výrobnách se instalují zvyšovací transformátory, kterými se zvýší napětí z velikosti vhodné pro výrobu na velikost vhodnou pro přenos.

Na konci dálkových rozvodných sítí pracují snižovací transformátory, ve kterých se napětí sníží na velikost vhodnou pro další rozvod v oblastech, obcích, sídlištích a závodech. Toto napětí bývá obvykle 6, 10, 22 nebo 35 kV. V centru odběru pracují další snižovací transformátory, které zajišťují transformaci tohoto napětí na napětí vhodné pro spotřebiče (obvykle 380/220 V, nebo 500 V, popř. 6000 V pro motory na vysoké napětí).

V energetické soustavě pracují i tzv. spojovací transformátory, kterými se spojují rozvodné systémy s různým jmenovitým napětím, a pojízdné transformátory, upravené pro provoz na železničním nebo silničním podvozku.

Kromě toho se používají transformátory pro různé speciální účely. Podle toho rozdělujeme transformátory na:

ohřívací, sloužící pro napájení zařízení pro odporový nebo indukční ohřev,

pecové, sloužící k napájení indukčních obloukových nebo odporových pecí,

svařovací, pro svařování elektrickým obloukem,

rozptylové, se zvláště velkým nebo měnitelným rozptylem, např. pro udržování elektrického oblouku,

rozmrazovací, upravené pro rozmrazování potrubí velkým proudem při malém napětí,

natáčivé, sloužící k plynulému řízení napětí nebo fázového posunu, s magnetickým obvodem uspořádaným podobně jako u indukčního motoru,

spouštěcí, sloužící ke spouštění indukčních motorů,

nevýbušné (báňské), upravené pro použití ve výbušném prostředí tak, že do nich nemůže výbušná směs vniknout nebo dojde-li k výbuchu uvnitř, nepřenese se tento výbuch do okolí,

oddělovací, sloužící pro napájení obvodů, které mají být odděleny od rozvodné sítě (ochrana před nebezpečným dotykovým napětím), starší název byl izolační transformátor,

bezpečnostní, sloužící pro napájení obvodů, ve kterých s ohledem na ochranu před nebezpečným dotykovým napětím smí být jen tzv. bezpečné napětí (podle prostředí 48, 24, 12 V),

usměrňovačové, sloužící k napájení usměrňovačů; kromě transformace napětí na vhodnou velikost zajišťují i změnu počtu fází, aby usměrněný proud měl co nejmenší dovolené zvlnění,

trakční, sloužící k napájení trolejového vedení u střídavé trakce,

lokomotivní, používané na lokomotivách napájených střídavým napětím a sloužící k napájení hlavních a pomocných obvodů lokomotivy,

zkušební, speciálně upravené pro účely zkoušek (např. pro zkratové zkoušky nebo pro zkoušky vysokým napětím) různých elektrických zařízení,

měřicí, určené pro měření při vysokých napětích a velkých proudech.

2.1.2. Popis jednofázového transformátoru

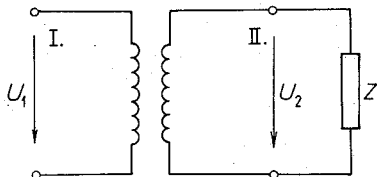
Jednofázový transformátor se skládá z *magnetického obvodu*, který je složen z transformátorových plechů (legovaných křemíkem) tloušťky 0,5 mm nebo častěji 0,35 mm, dále z *vinutí* a popřípadě *svorkovnice*.

Aby magnetizační proud potřebný k vybuzení magnetického toku byl co nejmenší, je magnetický obvod uzavřen, je tedy bez vzduchových mezer.

Na železném jádře jsou navinuty dvě cívky: vstupní (primární) I a výstupní (sekundární) II (obr. 1). Vstupní cívka je připojena na napětí U_1 ,

které se má transformovat, a na výstupní cívku s transformovaným napětím U_2 je připojen spotřebič.

Jednotlivá vinutí transformátoru můžeme podle velikosti napětí označovat zkratkou vn a nn, popř. názvem: strana vyššího napětí a strana nižšího napětí.



Obr. 1. Kreslení schémat transformátoru

Na obr. 1 je nakresleno schéma transformátoru podle ČSN 34 5505. Protože všechny technické transformátory mají železné jádro, nemusí se ve schématu zvlášť vyznačovat.

2.1.3. Popis trojfázového transformátoru

Na obr. 2 jsou aktivní části trojfázového olejového transformátoru vyjmuté z nádoby.

Hlavní části tohoto transformátoru jsou:

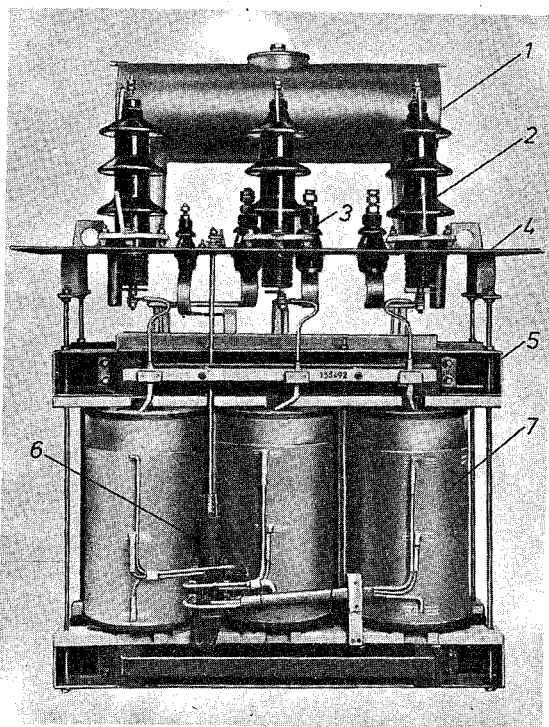
1. magnetický obvod,
2. vinutí,
3. nádoba naplněná olejem,
4. víko nádoby s příslušenstvím.

Magnetický obvod se skládá ze tří jader, která jsou spolu spojena dvěma spojkami. Každé jádro patří jedné fázi a je na něm upevněno vinutí nízkého i vysokého napětí. Na jádře je nejdříve navinuta cívka nízkého napětí a na ní (tedy dále od jádra) je navinuta cívka vysokého napětí. Obě cívky patří jedné fázi. Tyto cívky jednotlivých fází mohou být spolu spojeny do hvězdy, do trojúhelníka nebo do lomené hvězdy.

Spojky magnetického obvodu jsou stáhnuty postranicemi z profilové oceli a jejich pomocí je jádro s vinutím spojeno s víkem.

Na víku jsou porcelánové průchodky, které slouží k vyvedení konců cívek z transformátoru.

Transformátor je obvykle vybaven přepínačem odboček, který umožňuje hrubé řízení napětí v rozsahu $\pm 5\%$. Na přepínač jsou připojeny



Obr. 2. Aktivní části
olejového transformátoru
315 kVA, 6 kV,
VEB Transformatoren –
und Röntgenwerk, Dresden,
NDR

- 1 – dilatační nádoba,
- 2 – průchodka vn,
- 3 – průchodka nn,
- 4 – víko nádoby,
- 5 – stahovací konstrukce,
- 6 – přepínač odboček,
- 7 – cívka vn

vývody řídicích cívek. Přepínat odbočky lze jen při odpojení transformátoru, a to mechanismem, který je připevněn na víku.

Celý transformátor je vložen do ocelové nádoby naplněné olejem. Olej jednak zvětšuje elektrickou pevnost a jednak slouží k odvodu tepla z povrchu cívek a železa k povrchu nádoby.

Aby odvod tepla z povrchu nádoby byl co nejlepší, mívá vlastní nádoba ještě chladičí žebra, trubky nebo radiátory.

Ke dnu nádoby je připevněn podvozek, který umožňuje pohyb transformátoru.

Aby nádoba byla vždy dokonale naplněna olejem, je spojena trubkou s dilatační nádobou. Je to válcová nádoba připevněná na víku, do které olej vystupuje při změnách teploty (ohřívání). Hladinu oleje ukazuje olejznak.

Na víku nádoby jsou zdvihací oka, kterými můžeme jádro s vinutím z nádoby vytáhnout. Větší transformátory mají kromě těchto zdvihacích ok,

kteřá jsou spojena s víkem, ještě jeden zdvihací systém, zakotvený na dně nádoby, kterým lze zdvihat celý transformátor.

Na zadní straně transformátoru je připevňený štítek, na kterém můžeme číst jmenovité hodnoty transformátoru.

Přední strana transformátoru je ta, na které jsou průchodky vn; na zadní straně jsou průchodky nn.

Mezi dílatační nádobou a nádobou transformátoru je zapojeno Buchholzovo relé (plynové relé), které zajišťuje odpojení transformátoru při jeho vnitřní poruše.

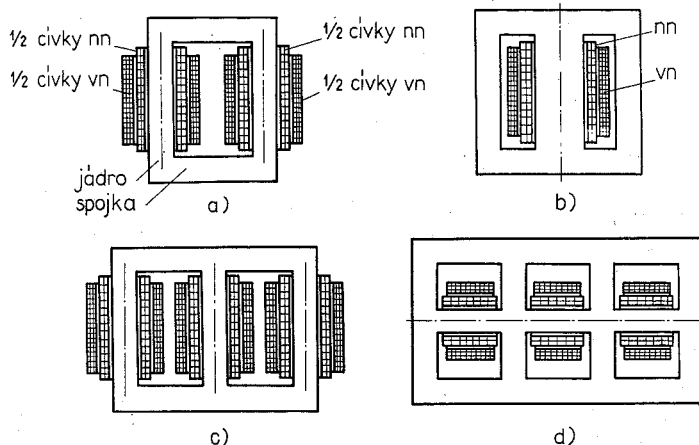
2.2. ROZDĚLENÍ TRANSFORMÁTORŮ

2.2.1. Podle počtu fází

Podle počtu fází rozdělujeme transformátory na:

1. jednofázové,
2. trojfázové.

Jednofázové transformátory jsou zpravidla jen malého výkonu, popř. slouží jen ke speciálním účelům (svařovací, rozmrazovací apod.). Jedno-



Obr. 3. Uspořádaní magnetického obvodu

- a) jednofázový jádrový transformátor, b) jednofázový plášťový transformátor, c) trojfázový jádrový transformátor, d) trojfázový plášťový transformátor

fázové transformátory velkých výkonů se používají v energetice tehdy, jestliže je třeba z nich sestavit trojfázovou skupinu takového výkonu, který by nebylo možné z konstrukčních a dopravních důvodů získat z jedné nádoby (transformátoru).

2.2.2. Podle uspořádání magnetického obvodu

Magnetický obvod transformátorů může být:

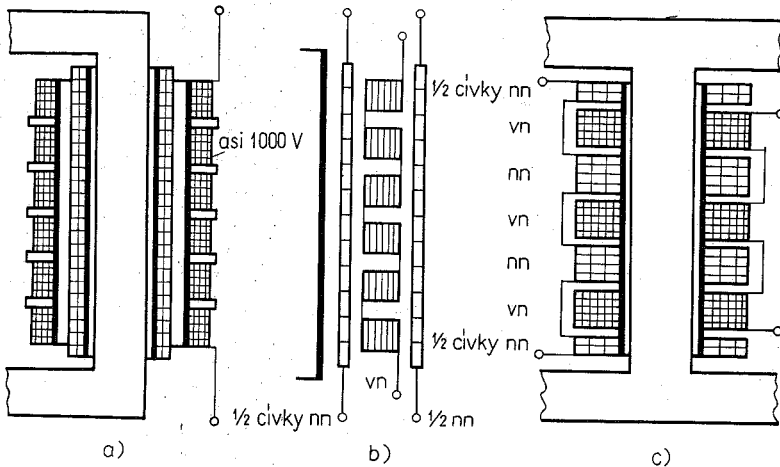
1. jádrový (obr. 3a, 3c),
2. plášťový (3b, 3d),
3. zvláštního provedení (čl. 2.20.).

Trojfázové plášťové transformátory jsou velmi ojedinělé, jejich technologie je velmi náročná a nákladná.

2.2.3. Podle uspořádání vinutí

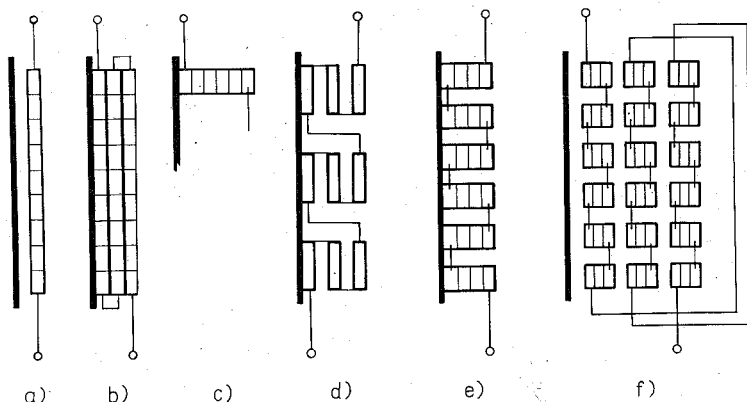
Podle vzájemného uspořádání vstupních a výstupních cívek může být vinutí:

1. Souosé (starší název soustředné)
 - a) jednoduché (obr. 4a),
 - b) dělené (obr. 4b).



Obr. 4. Úprava vinutí

a) jednoduché vinutí souosé, b) dělené souosé vinutí, c) střídavé vinutí



Obr. 5. Druhy cívek a vinutí

a) jednovrstvová cívka, b) trojvrstvá cívka, c) desková cívka, d) jednovrstvové vinutí složené ze tří trojvrstevných cívek, e) jednovrstvové plynulé vinutí z deskových cívek, f) trojvrstvé plynulé vinutí

2. Prostřídané (starší název deskové nebo kotoučové), obr. 4c.

Vinutí se skládá z cívek. Cívka může být zhotovena jako:

1. jednovrstvová (obr. 5a),
2. mnohovrstvová (na obr. 5b trojvrstvá),
3. desková, u níž jsou závit vinuty na sebe v jedné rovině (obr. 5c).

Konstrukce těchto cívek je uvedena v čl. 2.24.2.

Podle způsobu, jakým je z cívek vytvořeno vinutí jednoho napětí, rozeznáváme vinutí:

1. jednovrstvové, cívky jdou za sebou ve směru osy vinutí (starší název byl cívkové vinutí); obr. 5d, 5e.

2. mnohovrstvové vinutí, několik cívek je uspořádáno na sobě ve směru kolmém na osu vinutí (starší název polohové vinutí); obr. 5f.

3. plynulé vinutí, složené z plynule vinutých deskových cívek (starší název přesouvané či přesmyknuté vinutí); obr. 5e.

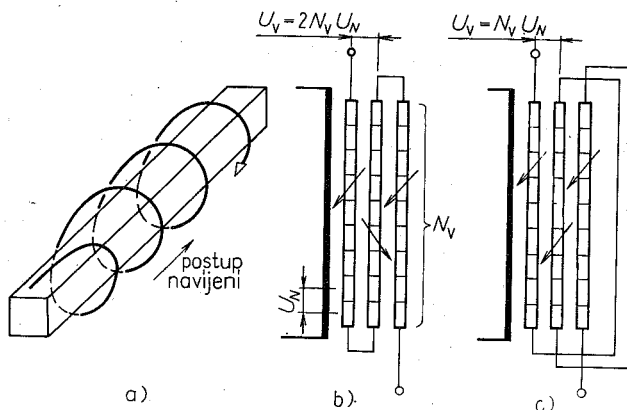
Na obr. 5f je příklad trojvrstvého plynulého vinutí.

Podle smyslu vinutí mohou být cívky:

1. pravotočivé, závit jsou ve směru postupu vinutí navinuty doprava (obr. 6a).

2. levotočivé, mají vinutí opačné.

Smysl vinutí je třeba přizpůsobit tomu, jakým způsobem jsou jednotlivé cívky nebo jejich vrstvy spojovány (obr. 6b, c).



Obr. 6. Pravotočivá cívka

- a) postup navijení, b) trojvrstvé vinutí s protiběžnými vrstvami,
c) trojvrstvé vinutí se stejným směrem navijení

Podle izolace vinutí proti zemi jsou:

1. transformátory s plnou izolací, celé vinutí i s případným uzlem je izolováno na plné napětí,
2. transformátory s redukovanou izolací, nulový bod (uzel) je izolován proti zemi na nižší napětí než vývody.

2.3. PRINCIP TRANSFORMÁTORU

V dalším výkladu budeme řešit poměry v jednofázovém transformátoru. Všechny získané výsledky však platí stejně i pro jednu fázi trojfázového transformátoru.

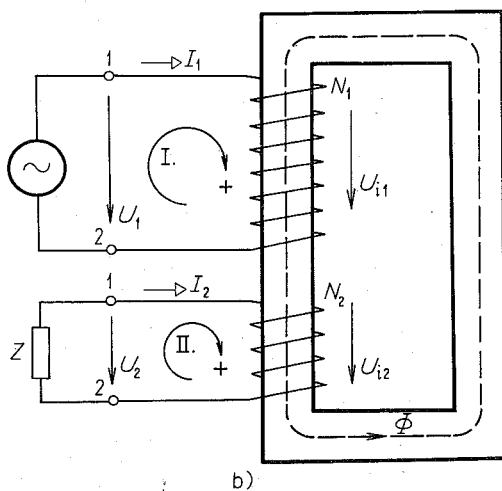
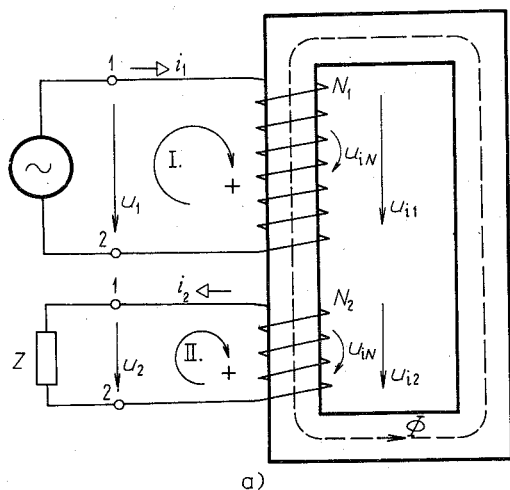
2.3.1. Schéma transformátoru s vyznačenými směry okamžitých hodnot

Na obr. 7a je nakresleno jádro, na kterém jsou navinuty cívky: vstupní I, která má N_1 závitů, a výstupní II, která má N_2 závitů. Obě cívky jsou pravotočivé. Pro lepší přehlednost jsou nakresleny nad sebou, ale ve skutečnosti jsou umístěny jedna na druhé.

Na svorky vstupní cívky 1 a 2 je připojeno střídavé napětí s okamžitou hodnotou u_1 . V nakresleném okamžiku má smysl např. od svorky 1

ke svorce 2. Napětím u_i se protlačí vinutím proud i_1 souhlasného smyslu, tedy také od svorky 1 ke svorce 2. Jestliže jsou smysly napětí a proudu souhlasné, je výkon vstupní cívky kladný a cívka představuje pro napájecí generátor spotřebič.

Primární proud procházející závitů N_1 vybudí v magnetickém obvodu tok Φ , jehož okamžitý smysl lze určit pravidlem pravé ruky. Tento



Obr. 7. Základní schéma transformátoru
 a) s vyznačenými smysly okamžitých hodnot,
 b) s vyznačením kladně zvoleného smyslu

magnetický tok je střídavý o kmitočtu sítě f . Časovou změnou toku se v jednom závitu vstupní cívky indukují napětí u_{iN} a ve všech jejich závitech napětí u_{i1} , jehož velikost je dána vztahem

$$u_{i1} = u_{iN}N_1 \quad (1)$$

Jestliže zanedbáme rozptyl, je stejně velký magnetický tok Φ spřažen se závity výstupní cívky. Jestliže jsou obě cívky navinuty ve stejném smyslu, indukují tento magnetický tok v jednom závitě výstupní cívky stejně velké a stejně orientované napětí u_{iN} . Napětí indukované v celé cívice s počtem závitů N_2 je dáno vztahem

$$u_{i2} = u_{iN}N_2 \quad (2)$$

a je orientované stejně jako napětí u_{i1} .

Jestliže je na svorky výstupního vinutí připojena zatěžovací impedance Z , bude jí procházet proud

$$i_2 = \frac{u_{i2}}{Z}$$

Smysl sekundárního proudu je podle Lencova pravidla orientován tak, aby jím vybuzený magnetický tok působil proti magnetickému toku, kterým byl indukován. Je tedy v každém okamžiku orientován proti smyslu primárního proudu. V naznačeném okamžiku prochází vnějším obvodem od svorky 1 ke svorce 2. Sekundární napětí u_2 má tedy také orientaci od svorky 1 ke svorce 2.

Ze schématu je vidět, že proud i_2 má ve vinutí smysl proti napětí u_2 , takže výkon je záporný. Sekundární strana transformátoru představuje zdroj elektrické energie. Zatěžovací impedancí prochází proud souhlasně se smyslem napětí, výkon je kladný, což odpovídá spotřebitelskému systému.

2.3.2. Schéma se zakreslenými kladnými smysly

Ve schématech střídavých elektrických obvodů se zpravidla nezakreslují smysly okamžitých hodnot, ale smysly, které byly zvoleny za kladné. V předcházejícím článku jsme kreslili okamžité smysly jen pro lepší názornost.

Na obr. 7b je předcházející schéma, ale jsou zde nakresleny jen kladné zvolené smysly jednotlivých veličin. Je vidět, že téměř všechny

souhlasí s obr. 7a, pouze smysl proudu I_2 je orientován opačně. Musí totiž odpovídat kladnému smyslu napětí U_2 a stejně i kladně zvolenému proudu I_1 .

Tímto způsobem budeme vyznačovat smysl elektrických veličin ve všech dalších schématech.

2.4. VELIKOST INDUKOVANÉHO NAPĚTÍ

Napětí indukované v jednom závitě časovou změnou magnetického toku je dáno základním vztahem

$$u_{iN} = \frac{d\Phi}{dt}$$

Předpokládáme-li i sinusový průběh magnetického toku, je jeho okamžitá hodnota

$$\Phi = \Phi_{\max} \sin \omega t$$

takže

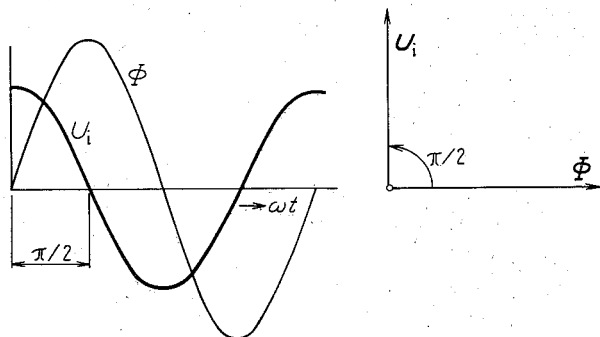
$$u_{iN} = \frac{d(\Phi_{\max} \sin \omega t)}{dt} = \omega \Phi_{\max} \cos \omega t$$

Průběh magnetického toku a jím indukovaného napětí je nakreslen na obr. 8. Z obrázku můžeme zjistit důležitý poznatek:

Indukované napětí předbíhá magnetický tok o 90° .

Maximální hodnota indukovaného napětí v jednom závitě je pro $\cos \omega t = 1$, tedy pro $\omega t = 0; 2\pi$

$$U_{iN \max} = \omega \Phi_{\max} = 2\pi f \Phi_{\max}$$



Obr. 8. Posun mezi magnetickým tokem a napětím, které se indukuje jeho časovou změnou

Efektivní hodnota indukovaného napětí

$$U_{iN} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{iN \max} = \frac{2}{\sqrt{2}} \pi f \Phi_{\max} = \pi \sqrt{2} f \Phi_{\max}$$

Magnetické veličiny střídavého průběhu se udávají vždy jejich maximální hodnotou, proto není třeba uvádět zvlášť index „max“. Potom tedy dostaneme

$$U_{iN} = \pi \sqrt{2} f \Phi = 4,44 f \Phi \quad [\text{V}; \text{Hz}, \text{Wb}] \quad (4)$$

Napětí indukovaná v jednotlivých vinutích jsou dána vztahy

$$U_{i1} = U_{iN} N_1 = 4,44 f \Phi N_1 \quad (5)$$

$$U_{i2} = U_{iN} N_2 = 4,44 f \Phi N_2 \quad (6)$$

2.5. PŘEVOD TRANSFORMÁTORU

Budeme-li uvažovat ideální transformátor, u kterého zanedbáme vnitřní odpory a rozptylové magnetické toky, platí pro obvod vstupní a výstupní cívky II. Kirchhoffův zákon (obr. 7b)

$$U_1 - U_{i1} = 0$$

$$U_2 - U_{i2} = 0$$

Z něho dostaneme

$$U_1 = U_{i1} \quad (7)$$

$$U_2 = U_{i2} \quad (8)$$

Rovnice musíme psát pomocí fázorů, neboť jde o veličiny, které se s časem sinusově mění.

Kladný smysl napětí byl v obou obvodech zvolen souhlasně podle nakreslených šipek.

Podle rovnic (7) a (8) jsou svorková napětí a indukovaná napětí stejně velká a stejného smyslu, takže číselně platí

$$U_1 = U_{i1} = 4,44 f \Phi N_1 \quad (9)$$

$$U_2 = U_{i2} = 4,44 f \Phi N_2 \quad (10)$$

Převodem transformátoru rozumíme poměr svorkových napětí

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{4,44f\Phi N_1}{4,44f\Phi N_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

tedy

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (11)$$

Napětí jsou přímo úměrná počtu závitů.

Poměr proudů ve vstupním a výstupním vinutí můžeme odvodit z rovnosti příkonů

$$P_1 = P_2 \\ U_1 I_1 = U_2 I_2$$

takže úplná rovnice převodu je

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (12)$$

Proudy jsou v převráceném poměru k napětím i k počtu závitů.

Převod transformátorů se udává poměrem napětí při chodu naprázdno, kdy lze úbytky napětí na vnitřních odporech vstupního vinutí zanedbat. Jen u transformátorů do výkonu 5 kVA se udává poměr napětí při jmenovitém zatížení.

Výkon transformátoru jako každého zdroje elektrické energie střídavého proudu se udává zdánlivým výkonem (kVA), neboť velikost činného výkonu je dána charakterem zatížení, tzn. jeho účinnkem.

O chodu naprázdno mluvíme tehdy, jestliže je výstupní vinutí transformátoru rozpojeno, tzn. když transformátor není zatížen.

2.6. IDEÁLNÍ TRANSFORMÁTOR, VZNIK NÁHRADNÍHO SCHÉMATU

2.6.1. Zatížený transformátor

Schéma zapojení ideálního transformátoru (při zanedbání činných odporů a rozptylového magnetického toku) s převodem $p \neq 3$ je na obr. 9a.

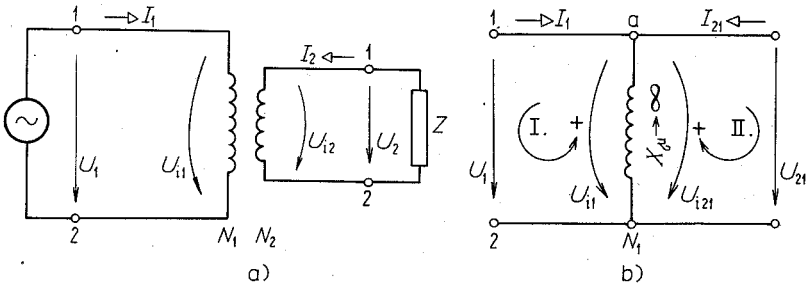
Při vodivosti magnetického obvodu blížíci se nekonečnu je tedy $\mu \rightarrow \infty$ a můžeme psát

$$H = \frac{B}{\mu} = \frac{B}{\infty} = 0$$

což vzhledem ke vztahu

$$F_m = Hl = 0$$

znamená, že k protlačení magnetického toku magnetickým obvodem ideálního transformátoru není zapotřebí žádné magnetomotorické napětí.



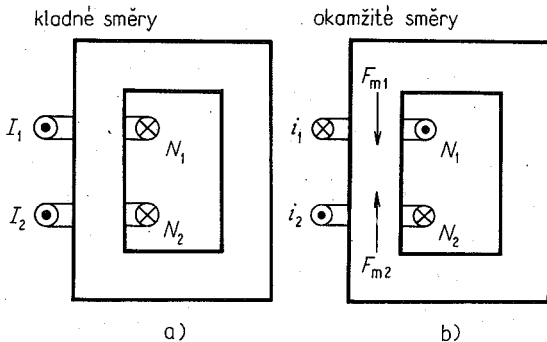
Obr. 9. Neskutečný ideální transformátor s nekonečnou vodivostí magnetického obvodu
a) normální schéma, b) náhradní schéma

Podle obr. 10, na kterém jsou zjednodušeně nakreslena vinutí transformátoru, kterými procházejí proudy i_1 a i_2 s udanými kladnými smysly, musí platit

$$F_m = i_1 N_1 + i_2 N_2 = 0$$

Z toho vypočítáme

$$i_1 = -i_2 \frac{N_2}{N_1} \quad (13)$$



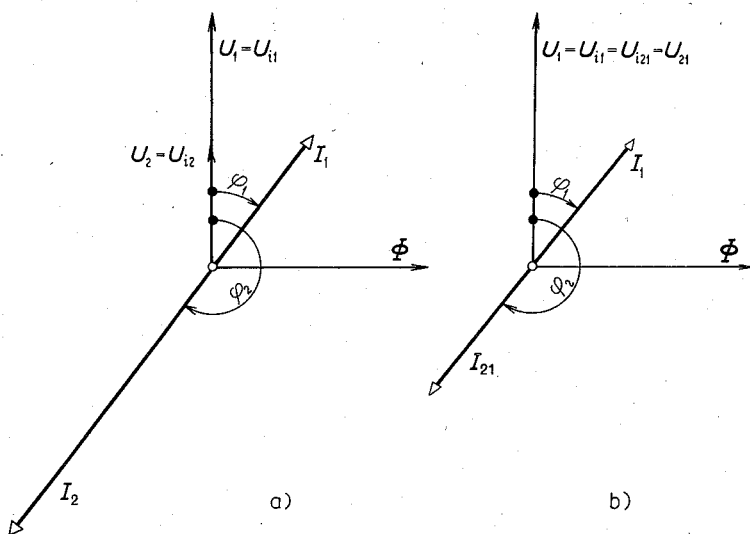
Obr. 10. Magnetomotorické napětí vstupního a výstupního vinutí

To znamená, že velikost primárního proudu je v každém okamžiku dána velikostí zatěžovacího sekundárního proudu, který závisí na velikosti zatížení. Smysly okamžitých proudů jsou podle obr. 10b opačné. Ze vztahu (13) je zřejmé, že při změně zatížení se bude měnit nejen sekundární, ale i primární proud.

Oba obvody se chovají tak, jako by byly spolu galvanicky svázány. Této skutečnosti využijeme při kreslení náhradních schémat.

Mění-li se proudy i_1 a i_2 s časem podle sinusového průběhu, platí vztah (13) nejen pro okamžité hodnoty, ale i pro fázory

$$I_1 = -I_2 \frac{N_2}{N_1} \quad (14)$$



Obr. 11. Fázorový diagram zatíženého neskutečného, ideálního transformátoru
a) zakreslené skutečné hodnoty, b) zakreslené hodnoty přepočtené na vstupní stranu

Na obr. 11a je fázorový diagram indukčně zatíženého ideálního transformátoru s převodem $p = 3$.

Při kreslení fázorových diagramů budeme zpravidla vycházet z magnetického toku.

Indukované napětí U_{11} předbíhá magnetický tok Φ o 90° , svorkové napětí U_1 je stejně velké a má stejný smysl. Indukované napětí U_{12}

je stejně orientováno jako U_{11} a tím i svorkové napětí U_2 je ve fázi s napětím U_1 .

Zatěžovací proud I_2 musí mít činnou i jalovou složku zápornou, aby jeho činný i jalový výkon podle používaného spotřebitelského systému byl záporný, tzn. dodáván do sítě. Vzhledem k napětí U_2 je proud I_2 posunut o úhel φ_2 .

Vstupní primární proud I_1 , daný vztahem (14), je opačného smyslu, takže se zpožďuje za napětím U_1 o úhel φ_1 . Jeho činná i jalová složka je kladná, to odpovídá kladnému výkonu vstupního vinutí.

Účinník sekundárního proudu $\cos \varphi_2$ je záporný, takže výkon na sekundární straně vychází záporný i podle rovnice

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$$

2.6.2. Přepočítání výstupních veličin na vstupní stranu

Fázorový diagram na obr. 11a odpovídá transformátoru s převodem $p = U_1/U_2 \doteq 3$. Převody silových transformátorů bývají značně větší, např. $22\,000/400 = 55$. Ve fázorovém diagramu by potom vyšel fázor proudu I_2 vlastně 55krát větší, než je fázor proudu I_1 a podobně i napětí U_1 by bylo 55krát větší než napětí U_2 . Fázorový diagram by nebylo možné zobrazit v přijatelném měřítku.

Proto se při kreslení fázorových diagramů všechny veličiny, týkající se výstupního obvodu, přepočítávají na vstupní stranu. Veličiny se přepočtou tak, jako by šlo o transformátor s převodem 1

$$U_{21} = U_2 \frac{N_1}{N_2} \quad (15)$$

$$I_{21} = I_2 \frac{N_2}{N_1} \quad (16)$$

Index 21 udává, že jde o výstupní veličinu (2), ale přepočtenou na vstupní stranu (1).

Dosadíme-li do těchto rovnic za veličiny U_2 a I_2 vztahy vyplývající z rovnice převodu

$$U_2 = U_1 \frac{N_2}{N_1} \quad I_2 = I_1 \frac{N_1}{N_2}$$

dostaneme

$$U_{21} = U_1 \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{N_1}{N_2} = U_1$$

$$I_{21} = I_1 \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{N_2}{N_1} = I_1$$

U ideálního transformátoru se přepočítané číselné hodnoty jednotlivých veličin rovnají číselným hodnotám vstupních veličin. Fázorový diagram s přepočtenými veličinami je na obr. 11b.

U skutečného transformátoru, u něhož nebudeme zanedbávat úbytky napětí, se nebudou číselné hodnoty přepočítaných veličin rovnat číselným hodnotám vstupních veličin, takže z jejich rozdílu bude možné názorně posuzovat různé stavy transformátoru a vliv jednotlivých veličin na jeho chod.

2.6.3. Náhradní schéma ideálního transformátoru

Ze schématu na obr. 9a není vidět, jak se obvody navzájem ovlivňují a jak se chovají při změně zatížení.

Proto se při zkoumání transformátorů a ostatních elektrických strojů s výhodou používá tzv. *náhradní schéma*, ve kterém se vstupní i výstupní obvod galvanicky spojí podle obr. 9b. Takové spojení je možné, jestliže uvažujeme výstupní veličiny přepočítané na vstupní stranu. Vinutí transformátoru je představováno jedinou cívkou, neboť přepočítaným veličinám odpovídá transformátor se stejným počtem závitů na vstupní i výstupní straně.

U popsaného ideálního transformátoru předpokládáme, že reaktance společného vinutí X_μ na obr. 9b je nekonečně velká, neboť potom jí neprochází proud.

Poměry v transformátoru se zjistí řešením náhradního schématu pomocí Kirchhoffových zákonů. Získané výsledky o výstupní straně můžeme pak přepočítat zpět na skutečný počet závitů výstupní cívky.

V náhradním schématu se opět zakreslují jen kladně zvolené smysly!

Pro uzel *a* můžeme psát (podle I. Kirchhoffova zákona)

$$I_1 + I_{21} = 0$$

a z toho

$$I_1 = -I_{21} \quad (17)$$

Tento výsledek souhlasí s rovnicí (14), dosadíme-li za proud I_{21} vztah

$$I_2 \frac{N_2}{N_1}$$

Tím je správnost kreslení smyslů proudů dokázána.

Jestliže v obou obvodech zvolíme určitý smysl oběhu za kladný (vyznačený šipkou), platí pro tyto obvody II. Kirchhoffův zákon.

Obvod I

$$U_1 - U_{i1} = 0$$

a z toho

$$U_1 = U_{i1} \quad (18)$$

Obvod II

$$U_2 - U_{i2} = 0$$

a z toho

$$U_2 = U_{i2} \quad (19)$$

Půltučně a ležatě vysázená písmena udávají, že jde o fázory. Podmínečné rovnice pro obvody střídavého proudu platí jen pro fázory.

Rovnice (17), (18) a (19) souhlasí s výsledky, které jsme dostali při kreslení fázorového diagramu na obr. 11b.

2.7. SKUTEČNÝ TRANSFORMÁTOR NAPRÁZDNO

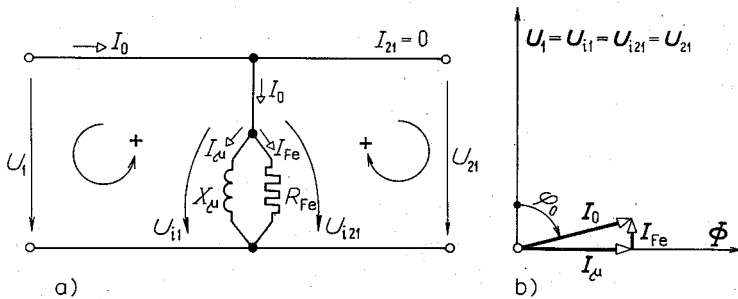
2.7.1. Magnetizační proud

Magnetický obvod skutečného transformátoru má jen konečnou vodivost, takže k vytvoření magnetického toku je třeba magnetomotorické napětí HI . Tzn., že i při chodu naprázdno musí vstupním vinutím procházet jistý proud, který se nazývá magnetizační proud I_μ . Magnetizační proud je ve fázi s magnetickým tokem, který budí.

V náhradním schématu (obr. 12a) je magnetizační proud nakreslen tak, jako by procházel vinutím s reaktancí X_μ . Tato reaktance se nazývá reaktance vzájemné indukčnosti a je dána vztahem

$$X_\mu = \frac{U_{i1}}{I_\mu} \quad [\Omega; V, A] \quad (20)$$

Je to jen fiktivní veličina, kterou se číselně vyjadřuje vliv napětí indukovaného ve vinutí na velikost magnetizačního proudu.



Obr. 12. Skutečný transformátor naprázdno

2.7.2. Ztrátový proud

Při střídavé magnetizaci magnetickým tokem Φ vznikají v magnetickém obvodu ztráty ΔP_{Fe} , které se skládají ze ztrát hysterezních a ze ztrát způsobených vířivými proudy. Ztráty v železe se mění na teplo, kterými se jádro zahřívá. Na jejich krytí musí transformátor i při chodu naprázdno odebírat ze sítě proud I_{Fe} , jehož velikost vypočítáme ze vztahu

$$I_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe}}{U_1} \quad [A; W, V] \quad (21)$$

V náhradním schématu na obr. 12 prochází tento proud fiktivním odporem R_{Fe} , který je paralelně připojen k reaktanci X_{μ} . Velikost tohoto odporu určíme takto: Ztrátový proud I_{Fe} musí v tomto odporu vyvolat ztráty rovnající se ztrátám v železe. Platí

$$\Delta P_{Fe} = I_{Fe}^2 R_{Fe}$$

a z této podmínky vychází i velikost odporu

$$R_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe}}{I_{Fe}^2} \quad [\Omega; W, A] \quad (22)$$

2.7.3. Fázorový diagram

Při chodu naprázdno odebírá transformátor ze sítě jalový magnetizační proud I_{μ} a činný ztrátový proud I_{Fe} . Součet těchto proudů

$$I_{\mu} + I_{Fe} = I_0 \quad (23)$$

se nazývá *proud naprázdno*.

Jeho absolutní velikost vypočítáme ze vztáhu

$$I_0 = \sqrt{I_\mu^2 + I_{Fe}^2}$$

Chod naprázdno podle náhradního schématu (obr. 12a) vystihuje fázorový diagram na obr. 12b.

Uvedené náhradní schéma a fázorový diagram neodpovídají skutečnosti. Zanedbává se zde činný odpor vinutí a rozptylový magnetický tok, buzený proudem naprázdno. Toto zanedbání je možné vzhledem k tomu, že proud naprázdno je poměrně malý a úbytek napětí na činném odporu vstupního vinutí i rozptylový magnetický tok jsou nepatrné. Podobně se zanedbávají i ztráty ve vinutí, takže ztráty v železe můžeme považovat za ztráty naprázdno.

Proud naprázdno I_0 je poměrně malý, neboť je tvořen hlavně magnetizačním proudem, který je pro uzavřený magnetický obvod také malý. Pohybuje se v rozsahu 10 až 5 % jmenovitého vstupního proudu. Menší hodnoty odpovídají transformátoru s větším výkonem.

2.7.4. Výpočet magnetizačního proudu

Magnetizační proud by bylo možné určit z celkového magnetomotorického napětí, potřebného k protlačení magnetického toku magnetickým obvodem transformátoru

$$\Sigma Hl = \sqrt{2} I_\mu N_1$$

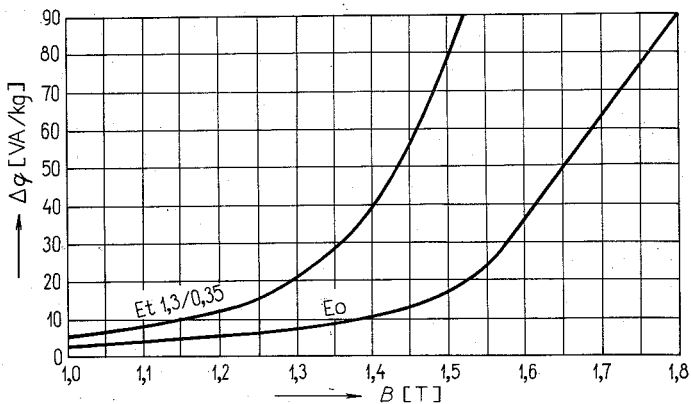
přičemž intenzita magnetického pole H odpovídá maximální hodnotě magnetického toku a I_μ je efektivní hodnota magnetizačního proudu.

Tento výpočet není vhodný ani praktický, neboť není vždy možné jednoznačně určit délku jednotlivých úseků a kromě toho průběh budicího proudu není přesně sinusový.

Výhodnější je vypočítat magnetizační proud z tzv. měrného magnetizačního příkonu Δq , který udává magnetizační příkon potřebný k vybuzení magnetického toku v jednom kilogramu železa při dané magnetické indukci. Udává se ve VA kg⁻¹ a pro používané plechy je vnesen do diagramů jako funkce magnetické indukce (obr. 13). Údaje v diagramech počítají i se zvětšením příkonu vzdúchovou mezerou v místech přeplátování plechů.

Celkový magnetizační příkon pro magnetický obvod o hmotnosti m_{Fe} je dán výrazem

$$m_{Fe} \Delta q = I_\mu U_1$$



Obr. 13. Měrný magnetizační příkon transformátorových plechů
Et 1,3/0,35 – plechy válcované za tepla, Eo – plechy válcované za studena

a z toho budící proud je

$$I_{\mu} = \frac{m_{Fe} \Delta q}{U_1} \quad [A; \text{kg}, \text{VA kg}^{-1}, \text{V}] \quad (26)$$

Májí-li jádra a spojky různé průřezy, a tedy i různé magnetické indukce B_j a B_s , je třeba určit zvlášť z tabulky velikosti Δq_j a Δq_s a potom vypočítáme magnetizační proud

$$I_{\mu} = \frac{m_j \Delta q_j + m_s \Delta q_s}{U_1} \quad (27)$$

kde m_j je hmotnost jader,
 m_s hmotnost spojek.

2.7.5. Ztráty naprázdno

Při chodu naprázdno vznikají v transformátoru ztráty v železe a ztráty způsobené průchodem proudu naprázdno vstupním vinutím. Vzhledem k malému proudu naprázdno jsou ztráty ve vinutí velmi malé, proto se nevyčísľují zvlášť, ale jsou už zahrnuty ve ztrátách v železe.

Ztráty v železe pro kmitočet $f = 50$ Hz jsou dány vztahem

$$\Delta P_{Fe} = k \Delta p_{1,0} m_{Fe} B^2 \quad [W; -, \text{W kg}^{-1}, \text{kg}, \text{T}] \quad (28)$$

kde $k = 1,05$ až $1,2$ je činitel přídatných ztrát vzniklých skládáním a opracováním plechů,

$\Delta p_{1,0}$ jsou jmenovitě měrné ztráty použitých plechů; udávají ztráty v jednom kilogramu plechů pro magnetickou indukci 1 T a pro kmitočet 50 Hz,

m_{Fe} je hmotnost železa,

B magnetická indukce v železe.

V rovnici (28) se uvažuje kvadratická závislost ztrát v železe na magnetické indukci. Ve skutečnosti však ztráty rostou rychleji, a proto je výhodnější počítat ztráty v železe z tzv. měrných ztrát Δp_B , které udávají celkové ztráty v železe při magnetické indukci B a při kmitočtu 50 Hz.

Potom dostaneme vztah

$$\Delta P_{Fe} = k \Delta p_B m_{Fe} \quad [W; -, W \text{ kg}^{-1}, \text{kg}] \quad (29)$$

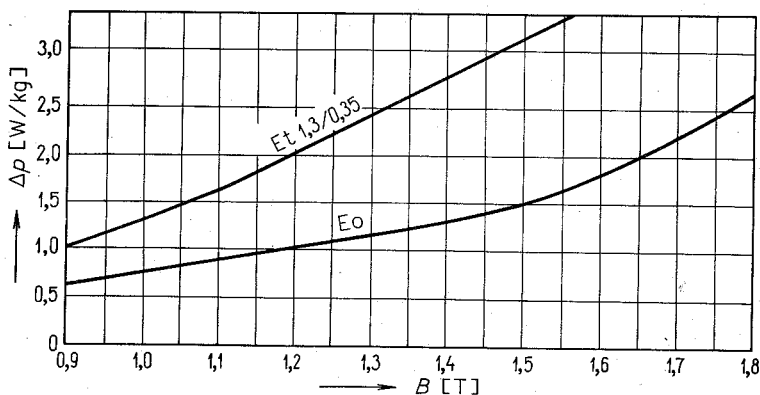
a pro různé průřezy jader a spojek

$$\Delta P_{Fe} = k(\Delta p_{Bj} m_j + \Delta p_{Bs} m_s) \quad (30)$$

Ztráty naprázdno se označují bez ohledu na jejich původ jako ΔP_0 , takže platí

$$\Delta P_0 = \Delta P_{Fe}$$

Měrné ztráty transformátorových plechů jsou v diagramu na obr. 14.



Obr. 14. Měrné ztráty transformátorových plechů
Et 1,3/0,35 – plechy válcované za tepla, Eo – plechy válcované za studena

2.7.6. Hospodářský význam ztrát v železe

Transformátor je zpravidla trvale připojen k síti, takže z ní stále odebírá výkon potřebný ke krytí ztrát v železe. Jejich velikost je proto mírou hospodárnosti transformátoru a podle těchto ztrát se posuzuje kvalita transformátorů.

Podstatné zmenšení ztrát v železe umožňuje použití tzv. orientovaných plechů. Jsou to plechy válcované za studena, jejichž měrné ztráty jsou jen 0,6 až 0,8 W kg⁻¹.

2.8. TRANSFORMÁTOR PŘI ZATÍŽENÍ

2.8.1. Přepočítání odporů z výstupní strany na vstupní stranu

U skutečného transformátoru je třeba respektovat nejen magnetizační proud, ale i činné odpory obou vinutí a rozptylový magnetický tok. Aby se tyto odpory a rozptylovému magnetickému toku odpovídající reaktance daly nakreslit do náhradního schématu, musí být všechny vztaženy na primární, tzn. vstupní stranu.

Činný odpor sekundárního vinutí se na vstupní stranu přepočítá z podmínky, aby přepočítaný proud I_{21} v přepočítaném odporu R_{21} (v náhradním schématu) vyvolal stejné ztráty, jaké ve skutečném odporu sekundárního vinutí R_2 vyvolává skutečný proud I_2

$$I_2^2 R_2 = I_{21}^2 R_{21}$$

a z toho

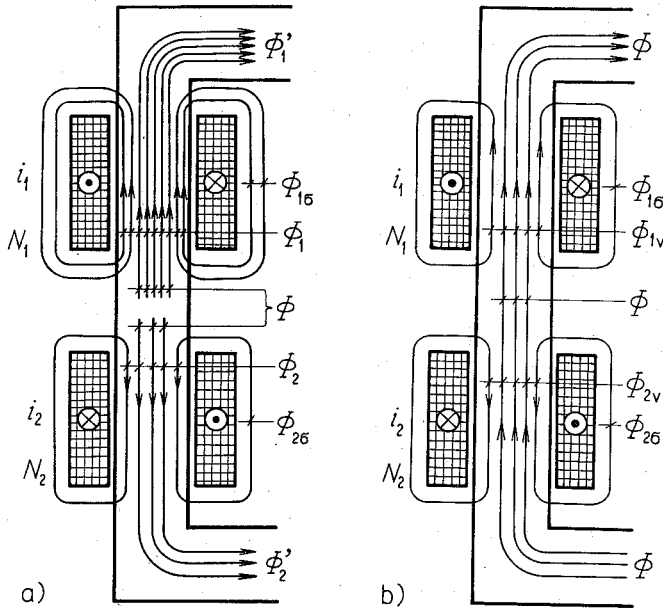
$$R_{21} = R_2 \frac{I_2^2}{I_{21}^2} = R_2 \frac{N_1^2}{N_2^2} = R_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (31)$$

Stejně můžeme přepočítat i reaktance

$$X_{21} = X_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (32)$$

2.8.2. Rozptyl

Na obr. 15a je jádro transformátoru se vstupní a výstupní cívkou. Pro lepší názornost jsou obě cívky kresleny pod sebou (ve skutečnosti jsou na sobě).



Obr. 15. Magnetické toky transformátoru.

V cívkách jsou zakresleny okamžité směry proudů i_1 a i_2 , které jsou orientovány opačně. Předpokládáme, že magnetizační charakteristika jádra je přímková.

Proud I_1 procházející závití N_1 vybudí v jádře magnetický tok Φ_1 . Jeho smysl je dán pravidlem pravé ruky. Část tohoto magnetického toku se uzavírá kolem vstupních závitů a vytváří rozptylový magnetický tok $\Phi_{1\sigma}$.

Rozptylový magnetický tok není spřažen s oběma vinutími, ale uzavírá se přes tzv. rozptylové cesty jen kolem jednoho vinutí.

Na obrázku je jeho průběh znázorněn jen schematicky.

Proud I_2 procházející závití N_2 budí v jádře magnetický tok Φ_2 , který je orientován proti toku Φ_1 . Část magnetického toku Φ_2 se uzavírá kolem vlastních závitů N_2 a vytváří rozptylový magnetický tok $\Phi_{2\sigma}$.

Jádrem transformátoru prochází součet magnetických toků Φ'_1 a Φ'_2 , který je představován společným magnetickým tokem Φ , spřaženým s oběma vinutími a buzený magnetizačním proudem I_μ .

kde

$$\Phi = \Phi'_1 + \Phi'_2$$

$$\Phi_1 = \Phi_1 - \Phi_{1\sigma}$$

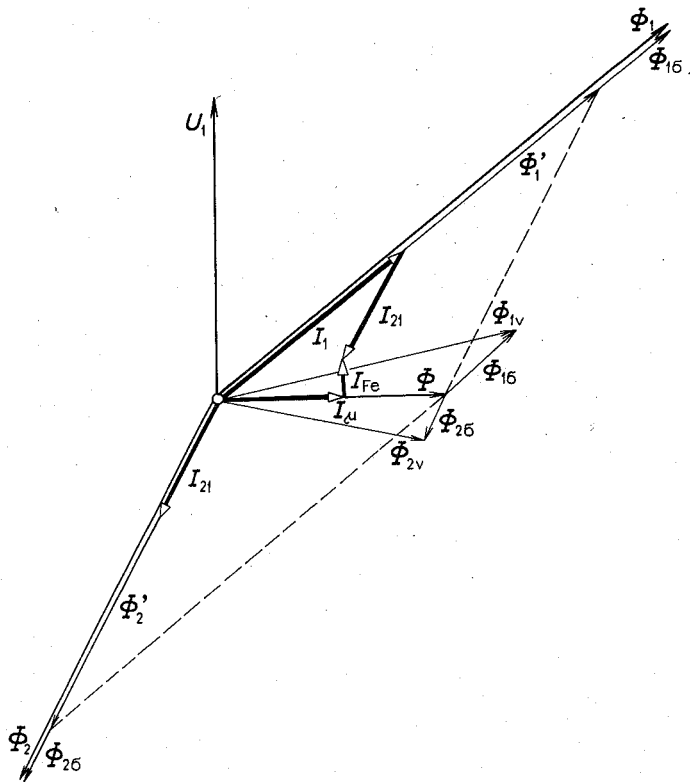
$$\Phi_2 = \Phi_2 - \Phi_{2\sigma}$$

Společný magnetický tok Φ je nakreslen v obr. 15b. Z tohoto obrázku vyplývá, že výsledné magnetické toky, sprážené s jednotlivými cívkami, jsou

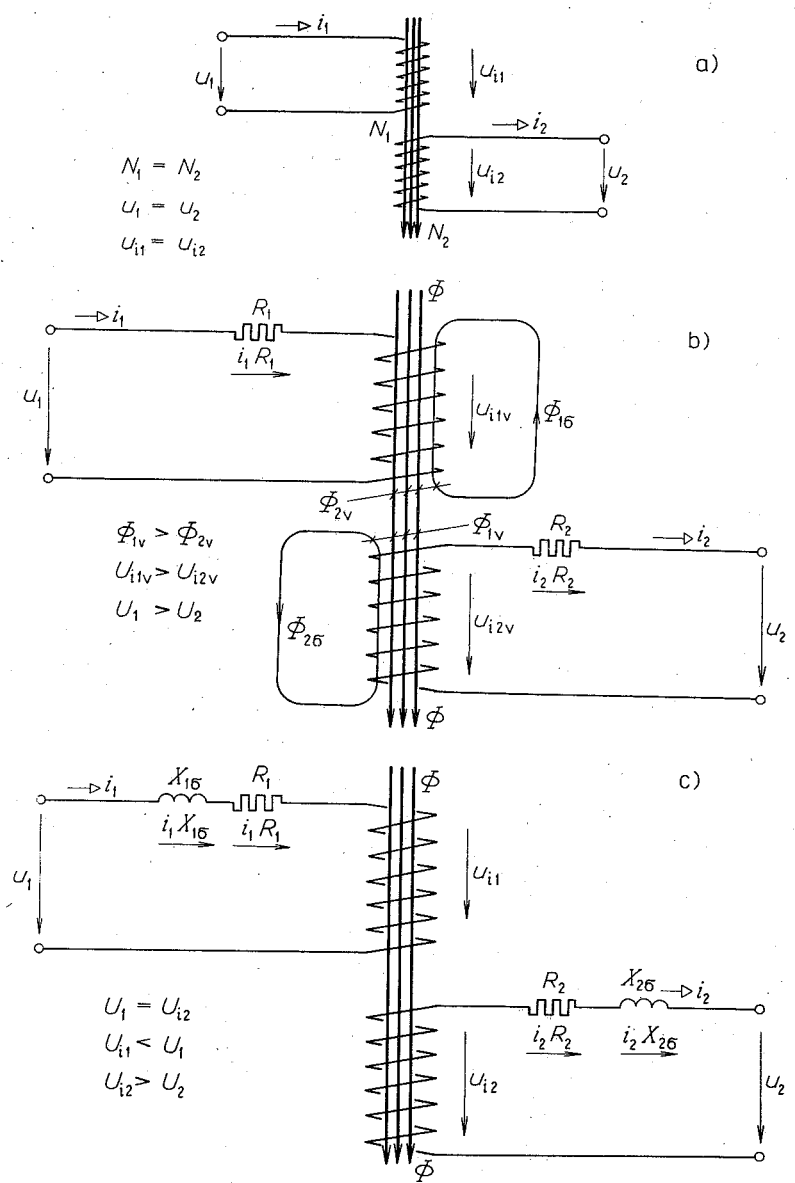
$$\Phi_{1v} = \Phi + \Phi_{1\sigma} \quad (33)$$

$$\Phi_{2v} = \Phi + \Phi_{2\sigma} \quad (34)$$

Na obr. 16 je fázorový diagram magnetických toků a proudů při obvyklém indukčním zatížení (proud I_{21} ve třetím kvadrantu).



Obr. 16. Fázorový diagram proudů a magnetických toků skutečného transformátoru



Obr. 17. Vysvětlení reaktance vinutí

a) jednoduché schéma ideálního transformátoru s převodem 1:1, b) schéma se zřetelem k činnému odporu vinutí, c) vliv rozptylového magnetického toku nahrazeného reaktancemi

U ideálního transformátoru byl primární proud I_1 dán velikostí zatěžovacího proudu I_2 (I_{21})

$$I_1 = -I_{21}$$

U skutečného transformátoru musí být primární proud zvětšen o proud naprázdno

$$I_1 = -I_{21} + I_0 = -I_{21} + I_\mu + I_{Fe} \quad (35)$$

Ve fázi s proudem I_1 je magnetický tok Φ_1 , který se dělí na toky Φ'_1 a $\Phi_{1\sigma}$. Podobně ve fázi s proudem I_{21} je magnetický tok Φ_2 , který se dělí na toky Φ'_2 a $\Phi_{2\sigma}$. Součet zbytkových toků Φ'_1 a Φ'_2 dává společný magnetický tok Φ který je ve fázi s magnetizačním proudem I_μ , kterým je buzen.

Součet magnetického toku Φ a rozptylového toku $\Phi_{1\sigma}$, který je ve fázi s proudem I_1 , dává výsledný tok Φ_{1v} . Podobně součet magnetického toku Φ a rozptylového magnetického toku $\Phi_{2\sigma}$ dává výsledný magnetický tok Φ_{2v} . Rozptylový magnetický tok $\Phi_{2\sigma}$ je ve fázi s proudem I_{21} .

V dalších fázorových diagramech nebudeme už kreslit magnetické toky Φ_1 a Φ_2 .

V dalších úvahách budeme zkoumat vliv rozptylových magnetických toků na chod transformátoru. Aby byl výklad názornější, budeme opět předpokládat transformátor se stejným počtem závitů na obou stranách, schematicky nakreslený na obr. 17.

Kdybychom zanedbali vnitřní úbytky napětí na odporech vinutí a vliv rozptylu, byla by indukovaná napětí U_{11} a U_{12} , indukovaná společným magnetickým tokem Φ , stejně velká.

Na obr. 17b jsou naznačeny skutečné poměry při zatížení. Výsledný magnetický tok Φ_{1v} indukuje v primární cívce napětí U_{11v} . Primární cívka má činný odpor R_1 , na němž vzniká průchodem proudu I_1 činný úbytek napětí $I_1 R_1$. Indukované napětí U_{11v} je o tento úbytek napětí menší než primární napětí U_1 .

Kdyby nebylo sekundárního rozptylu, bylo by indukované napětí U_{12v} stejně velké. Výsledný magnetický tok Φ_{2v} je však zmenšen o rozptylový magnetický tok $\Phi_{2\sigma}$, takže napětí U_{12v} je ve skutečnosti menší.

Kdyby výstupní vinutí nemělo žádný činný odpor, bylo by výstupní napětí stejně velké jako indukované napětí U_{12v} . Na činném odporu výstupního vinutí vzniká však průchodem proudu úbytek napětí $I_2 R_2$, o který bude výstupní napětí menší než U_{12v} .

Příslušný fázorový diagram je na obr. 18.

Pro primární obvod platí (obr. 18a)

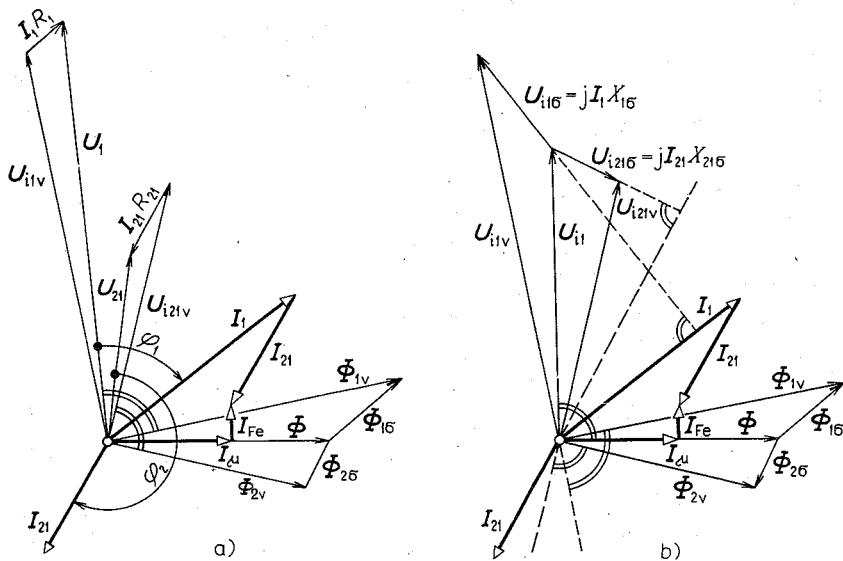
$$U_1 - I_1 R_1 - U_{11v} = 0$$

a z toho

$$\mathbf{U}_1 = \mathbf{U}_{i1v} + I_1 R_1 \quad (36)$$

Podobně pro sekundární vinutí

$$\mathbf{U}_2 = \mathbf{U}_{i2v} + I_2 R_2 \quad (37)$$



Obr. 18. Pomocné vysvětlující fázorové diagramy indukčně zatíženého transformátoru
 a) diagram se zakreslenými činnými úbytky napětí,
 b) diagram se zakreslenými i reaktančními úbytky napětí

Ve fázorovém diagramu jsou zakresleny přepočítané veličiny U_{21} , U_{i21v} , I_{21} .

Činné úbytky napětí jsou ve fázi s proudy, kterými jsou vyvolány.

Napětí U_{i1v} a U_{i21v} předbíhají o 90° před magnetickými toky, kterými jsou indukovány.

Jestliže magnetický tok Φ_{2v} je menší než magnetický tok Φ_{1v} , musí být i indukované napětí U_{i21v} menší než napětí U_{i1v} .

Indukovaná napětí U_{i1v} a U_{i21v} jsou v obr. 18 rozložena do dvou složek:

a) indukovaná napětí U_{i11} a U_{i211} , indukovaná společným magnetickým tokem Φ a předbíhající před ním o 90° .

b) napětí $U_{i1\sigma}$ a $U_{i21\sigma}$, indukovaná rozptylovými magnetickými toky, které také předbíhají o 90° .

Jsou-li rozptylové magnetické toky ve fázi s příslušnými proudy, je napětí $U_{i1\sigma}$ kolmé na proud I_1 a napětí $U_{i21\sigma}$ je kolmé na proud I_{21} .

Při kreslení fázorového diagramu s přepočítanými sekundárními veličinami je $U_{i1} = U_{i21}$.

Velikost jednotlivých indukovaných napětí je dána vztahy

$$U_{i1v} = 4,44\Phi_{1v}fN_1 \quad U_{i2v} = 4,44\Phi_{2v}fN_2$$

$$U_{i1\sigma} = 4,44\Phi_{1\sigma}fN_1 \quad U_{i2\sigma} = 4,44\Phi_{2\sigma}fN_2$$

$$U_{i1} = 4,44\Phi fN_1 \quad U_{i2} = 4,44\Phi fN_2$$

Z fázorového diagramu a z úvahy vyplývá

$$U_{i1v} = U_{i1} + U_{i1\sigma} \quad (38)$$

$$U_{i21v} = U_{i21} + U_{i21\sigma} \quad (39)$$

Kreslení fázorových diagramů a odvozování hledaných souvislostí se zjednoduší tímto způsobem:

a) Pro lepší názornost a přehlednost budeme dále uvažovat jen společný magnetický tok Φ a jím indukované napětí U_{i1} a U_{i2} , pro která platí $U_{i1} = U_{i21}$.

b) Indukovaná napětí rozptylových indukčností $U_{i1\sigma}$ a $U_{i2\sigma}$ nahradíme stejně velkými úbytky napětí, které by proudy I_1 a I_2 vyvolaly v myšlených, fiktivních reaktancích rozptylové indukčnosti $X_{1\sigma}$ a $X_{2\sigma}$.

Velikost těchto rozptylových indukčních reaktancí vypočítáme ze vztahů

$$U_{i1\sigma} = I_1 X_{1\sigma} \quad U_{i2\sigma} = I_2 X_{2\sigma}$$

a je tedy

$$X_{1\sigma} = \frac{U_{i1\sigma}}{I_1} \quad X_{2\sigma} = \frac{U_{i2\sigma}}{I_2} \quad (40)$$

Při kreslení náhradních schémat budeme předpokládat, že tyto reaktance jsou zapojeny do série s činnými odpory příslušných vinutí (obr. 17c).

Úbytky napětí na rozptylových reaktancích $I_1 X_{1\sigma}$ a $I_2 X_{2\sigma}$ musí před svými proudy předbíhat o 90° , takže podle diagramu na obr. 18b

platí

$$\mathbf{U}_{i1\sigma} = jI_1 X_{1\sigma} \quad \mathbf{U}_{i2\sigma} = jI_2 X_{2\sigma} \quad (41)$$

nebo pro přepočítané veličiny

$$\mathbf{U}_{i21\sigma} = jI_{21} X_{21\sigma} \quad (42)$$

To, že jsme úbytky napětí na rozptylových reaktancích násobili imaginární jednotkou j znamená, že tyto úbytky jsou vzhledem k příslušnému proudu pootočené o 90° v kladném smyslu. Jinak by pouhý výraz $I_1 X_{1\sigma}$ představoval fázor, který je ve fázi s proudem I_1 .

2.8.3. Náhradní schéma a fázorový diagram skutečného transformátoru

Poměrům v transformátoru odpovídá náhradní schéma nakreslené na obr. 19.

Pro uzel a platí I. Kirchhoffův zákon

$$I_1 + I_{21} = I_0$$

nebo

$$I_1 = -I_{21} + I_0 = -I_{21} + I_\mu + I_{Fe}$$

což odpovídá výsledku úvah v rovnici (35).

Podle II. Kirchhoffova zákona platí pro smyčku I

$$\mathbf{U}_1 - \mathbf{U}_{i1} - jI_1 X_{1\sigma} - I_1 R_1 = 0$$

a pro smyčku II

$$\mathbf{U}_{21} - \mathbf{U}_{i21} - jI_{21} X_{21\sigma} - I_{21} R_{21} = 0$$

Z toho plyne

$$\mathbf{U}_1 = \mathbf{U}_{i1} + jI_1 X_{1\sigma} + I_1 R_1 \quad (43)$$

$$\mathbf{U}_{21} = \mathbf{U}_{i21} + jI_{21} X_{21\sigma} + I_{21} R_{21} \quad (44)$$

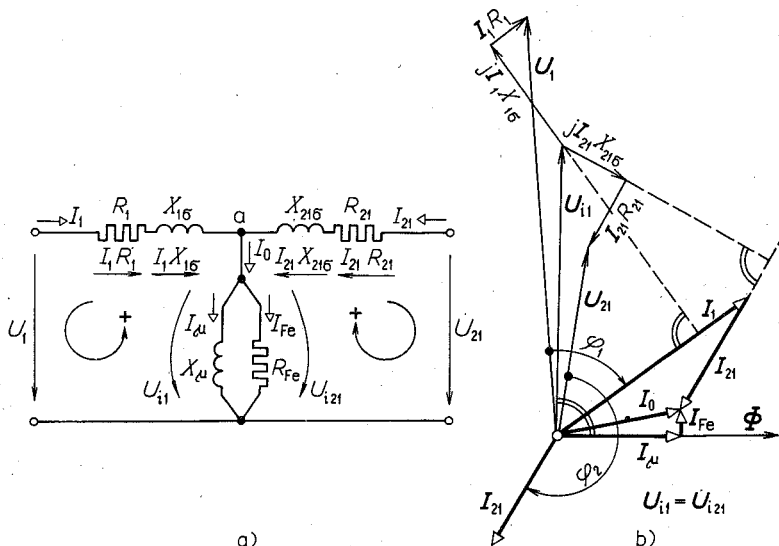
Při aplikování II. Kirchhoffova zákona se smysl úbytků napětí volí souhlasně se smyslem příslušných proudů.

Základním vztahům (43) a (44) odpovídá fázorový diagram indukčně zatíženého transformátoru podle obr. 19b. Při kreslení je vhodné vycházet

od žadaného výstupního napětí $U_2(U_{21})$ a od zatěžovacího proudu $I_2(I_{21})$, jehož velikost a fázový posun jsou dány charakterem a velikostí zátěže.

Příklad 1

Podle obr. 19b nakreslete fázorový diagram transformátoru s činným a kapacitním zatížením.



Obr. 19. Náhradní schéma a fázorový diagram zatíženého transformátoru

2.9. TRANSFORMÁTOR PŘI CHODU NAKRÁTKO

2.9.1. Definice a náhradní schéma

O transformátoru nakrátko mluvíme tehdy, jestliže jeho výstupní svorky jsou spojeny nakrátko bezodporovou spojkou.

Vstupním vinutím prochází při zkratu značný proud nakrátko I_{1k} a výstupním vinutím proud I_{2k} .

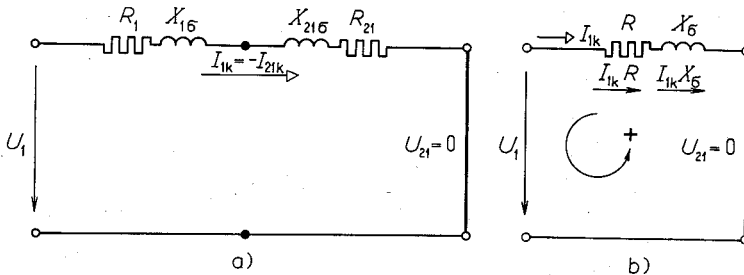
Velikost proudu nakrátko při přímém zkratu odvodíme z náhradního schématu na obr. 20a, ve kterém vynecháme reaktanci X_μ i náhradní odpor R_{Fe} . Při výpočtu tedy zanedbáváme magnetizační i ztrátový proud.

Magnetizační i ztrátový proud (tedy proud naprázdno I_0) můžeme při zkratu zanedbat proto, že bývá asi 200 až 400krát menší než proud nakrátko.

V náhradním schématu lze proud I_{21k} nahradit proudem I_{1k} podle známého vztahu $I_{1k} = -I_{21k}$, takže můžeme počítat, že celým obvodem prochází proud I_{1k} .

Jednotlivé odpory jsou potom zapojeny do série a můžeme je tedy sečíst

$$R = R_1 + R_{21} \quad X_\sigma = X_{1\sigma} + X_{21\sigma} \quad (45)$$



Obr. 20. Náhradní schéma transformátoru při chodu nakrátko
a) zanedbáme proud naprázdno, b) zjednodušení náhradního schématu

Náhradní schéma se tím zjednoduší podle obr. 20b, ze kterého je vidět, že při zkratu se transformátor chová jako spotřebič s činným odporem R a reaktancí X_σ .

Jestliže napětí U_2 , a tedy i U_{21} je nulové (spojka je bezodporová), platí podle II. Kirchhoffova zákona

$$U_1 - I_{1k}R - jI_{1k}X_\sigma = 0$$

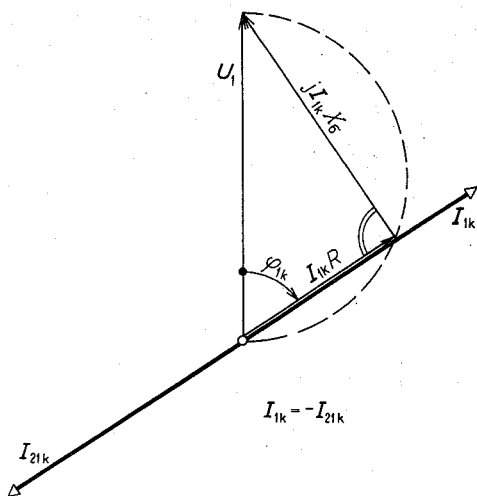
a z toho

$$U_1 = I_{1k}R + jI_{1k}X_\sigma = I_{1k}(R + jX_\sigma) = I_{1k}Z \quad (46)$$

kde impedance celého transformátoru, přepočtená na vstupní stranu je

$$Z = R + jX_\sigma \quad \text{nebo} \quad Z = \sqrt{R^2 + X_\sigma^2} \quad (47)$$

Fázový diagram chodu nakrátko je na obr. 21. Z něho je zřejmé, že celé přiváděné napětí se spotřebuje na krytí vnitřních úbytků napětí.



Obr. 21. Fázorový diagram chodu nakrátko

2.9.2. Měření nakrátko

Velikost proudu nakrátko je dána rovnicí (46)

$$I_{1k} = \frac{U_1}{Z} \quad (48)$$

Tento proud se nedá určit přímým měřením, neboť transformátor by během měření nevydržel jeho tepelné účinky. Určuje se nepřímou pomocí vnitřní impedance Z .

Impedance transformátoru se zjišťuje pokusem nakrátko. Výstupní svorky jsou spojeny nakrátko, vstupní strana je připojena na zdroj regulovatelného střídavého napětí. Přiváděné napětí se postupně zvyšuje (od nuly) tak dlouho, až ampérmetr v primárním obvodu ukazuje jmenovitý proud I_1 .

Nastavené napětí se nazývá napětí nakrátko a je podle (46) dáno vztahem

$$U_k = I_1 Z \quad [V; A, \Omega] \quad (49)$$

Napětí nakrátko je napětí, které výstupním vinutím transformátoru protlačuje jmenovitý proud I_1 , jsou-li jeho výstupní svorky spojeny nakrátko.

Udává se v procentech jmenovitého napětí U_1

$$u_k = \frac{U_k}{U_1} 100 = \frac{I_1 Z}{U_1} 100 \quad [\%] \quad (50)$$

U menších transformátorů (do 1600 kVA) bývá 4 až 6 %, u větších transformátorů až 11 %. Je předepsáno normami.

Je zřejmé, že při pokusu nakrátko prochází výstupním vinutím jmenovitý proud sekundární I_2 .

Jmenovité proudy transformátoru jsou dány vztahy

$$I_1 = \frac{P \cdot 10^3}{U_1}; \quad I_2 = \frac{P \cdot 10^3}{U_2} \quad [\text{A}; \text{kVA}, \text{V}] \quad (51)$$

u trojfázového transformátoru vztahy

$$I_1 = \frac{P \cdot 10^3}{3U_1}; \quad I_2 = \frac{P \cdot 10^3}{3U_2} \quad (52)$$

Kde U_1 a U_2 jsou fázová napětí,

P je jmenovitý výkon transformátoru.

Z napětí nakrátko lze určit impedanci transformátoru

$$Z = \frac{U_k}{I_1} = \frac{u_k U_1}{I_1}$$

a po úpravě

$$Z = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_1}{I_1} \quad [\Omega; \%, \text{V}, \text{A}] \quad (53)$$

takže pro trvalý proud nakrátko (48) dostaneme vztah

$$I_{1k} = \frac{U_1}{\frac{u_k U_1}{100 I_1}} = \frac{100}{u_k} I_1 \quad (54)$$

Čím větší je napětí nakrátko, tím menší je proud nakrátko. Trvalý proud nakrátko pro napětí nakrátko $u_k = (4 \text{ až } 5) \%$ je podle vztahu (54)

$$I_{1k} = (20 \text{ až } 25) I_1$$

Příklad 2

Jak velký bude trvaný proud nakrátko trojfázového transformátoru 10 000/400 V o výkonu 50 kVA, jestliže jeho napětí nakrátko při zapojení vstupního vinutí do hvězdy je 4 %? (Výsledek: $I_{1k} = 72,5 \text{ A}$, $I_{2k} = 1810 \text{ A}$).

2.9.3. Určení odporu a reaktance z měření nakrátko

Fázový posun při chodu nakrátko můžeme určit z výkonu nakrátko (měřeného např. wattmetrem)

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{U_k I_1} \quad (55)$$

Výkon, který při pokusu nakrátko odebírá transformátor ze sítě, se téměř celý spotřebuje na krytí ztrát ve vinutí transformátoru, neboť při zkratu jsou ztráty v železe vzhledem ke ztrátám ve vinutí zanedbatelné. Je tedy

$$P_k = \Delta P_j = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 = I_1^2 R_1 + I_{21}^2 R_{21}$$

takže tzv. ztráty nakrátko ΔP_k se rovnají Joulovým ztrátám ΔP_j ve vinutí

$$\Delta P_k = \Delta P_j = I_1^2 (R_1 + R_{21}) = I_1^2 R \quad [W; A, \Omega] \quad (56)$$

Odpor transformátoru můžeme tedy určit ze ztrát nakrátko

$$R = \frac{\Delta P_j}{I_1^2} = \frac{\Delta P_k}{I_1^2} \quad (57)$$

nebo z impedance

$$R = Z \cos \varphi \quad (58)$$

Reaktance transformátoru potom je

$$X_\sigma = Z \sin \varphi_k = Z \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_k} \quad (59)$$

nebo

$$X_\sigma = \sqrt{Z^2 - R^2} \quad (60)$$

U trojfázového transformátoru se udávají ztráty ve vinutí celého transformátoru, odpor jedné fáze potom je

$$R = \frac{\Delta P_k}{3I_1^2} \quad (61)$$

2.9.4. Složky napětí nakrátko

Napětí nakrátko se skládá z činné složky a ze složky reaktanční. Obě složky napětí lze vyjádřit v procentech jmenovitého napětí.

Činná složka napětí

$$u_R = \frac{I_1 R}{U_1} 100 \quad [%; A, \Omega, V] \quad (62)$$

Násobíme-li čitatele i jmenovatele I_1 , dostaneme

$$u_R = \frac{I_1^2 R}{U_1 I_1} 100$$

Po dosazení výkonu a ztrát ve vinutí platí

$$u_R = \frac{\Delta P_j}{P} 100 = \frac{\Delta P_k}{P} 100 \quad [%; W, VA] \quad (63)$$

U trojfázového transformátoru můžeme dosadit výkon celého transformátoru a celkové ztráty ve vinutí.

Reaktanční složka napětí

$$u = \frac{I_1 X_\sigma}{U_1} \cdot 100 \quad [%; A, \Omega, V] \quad (64)$$

nebo jednodušší vztah

$$u = \sqrt{u_k^2 - u_R^2} \quad [%;] \quad (65)$$

Příklad 3

Trojfázový olejový transformátor o výkonu 1000 kVA má při převodu 22 000/400 V ztráty nakrátko 14 200 W a napětí nakrátko 6 %. Určete jeho proud nakrátko a složky napětí v procentech.

(Výsledky: $I_{1k} = 440$ A, $I_{2k} = 24\,200$ A, $R = 6,85$ Ω , $\cos \varphi_k = 0,237$, $X_\sigma = 28$ Ω , $u_R = 1,42$ %, $u_X = 5,84$ %).

2.9.5. Účinky proudu nakrátko

Účinky zkratového proudu jsou: tepelné a mechanické.

a) Tepelně je vinutí transformátoru namáháno trvalým proudem nakrátko, kterým se vinutí nebezpečně oteplí.

b) Mechanicky je vinutí namáháno nárazovým proudem nakrátko, jehož působením vzniknou značné dynamické síly.

Dynamické síly se projevují i při rychlém odpojení zkratu, neboť vznikají okamžitě a každý vypínač má jisté zpoždění. Jestliže má být transformátor zkratuvzdorný, musí se jeho vinutí mechanicky kontrolovat

na příslušné mechanické namáhání. Právě tato skutečnost omezuje možnost použití hliníku pro vinutí transformátorů, neboť jeho mechanická pevnost je značně menší než mechanická pevnost mědi.

2.9.6. Výpočet odporu vinutí

Činný odpor vinutí se při návrhu vinutí počítá z rozměrů vinutí.

Pro cívku vyššího napětí platí

$$R_1 = \rho \frac{\pi d_{s1} N_1}{S_1} \quad (66)$$

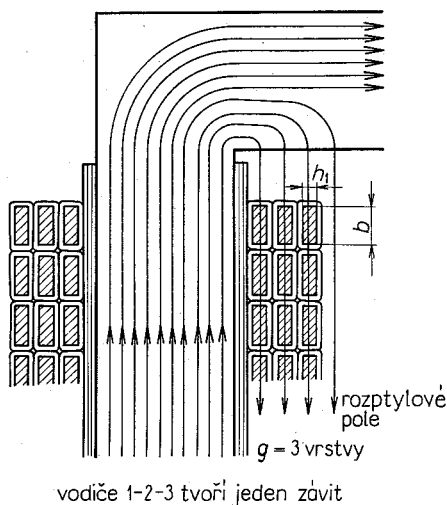
kde d_{s1} je průměr středního závitu.

Pro cívku nižšího napětí platí

$$R_2 = \rho \frac{\pi d_{s2} N_2}{S_2} (1 + k) \quad (67)$$

kde $(1 + k)$ je činitel dodatečných ztrát.

Dodatečné ztráty vznikají v masivních vodičích vinutí nižšího napětí tím, že rozptylové indukční čáry vytlačují proud k povrchu vodičů a tím zdánlivě zmenšují jejich průřez a zvětšují Joulovy ztráty. Zmenšují se dělením vodičů na několik paralelních větví.



Obr. 22. Rozměry vinutí pro určení činitele dodatečných ztrát

Velikost činitele k pro vinutí s paralelními větvemi můžeme přibližně určit z rovnice

$$k = \frac{g^2 - 0,2}{9} h_1^4 \quad [-; -, \text{ cm}] \quad (68)$$

kde h_1 je výška holého vodiče jedné paralelní větve (obr. 22),

g počet paralelních větví jednoho závitu, upravených nad sebou, kolmo na směr indukčních čar rozptylového magnetického toku.

Vinutí cívek vyššího napětí bývá zpravidla z vodičů menšího průřezu, takže při výpočtu odporu R_1 se dodatečné ztráty zanedbávají. Respektují se jen u transformátorů velkých výkonů.

Odpor výstupního vinutí, přepočítaný na vstupní stranu, se určí z rovnice (31).

Při stejné proudové hustotě ve vstupním i výstupním vinutí bývá odpor $R_1 \doteq R_{21}$.

2.9.7. Výpočet rozptylové reaktance vinutí

Na obr. 23a je zjednodušeně nakreslen průběh indukčních čar rozptylových toků $\Phi_{1\sigma}$ a $\Phi_{2\sigma}$ jednofázového plášťového transformátoru se sousými cívkami. Je vidět, že rozptylové indukční čáry obou rozptylových toků mají v prostoru mezi spojkami transformátoru souhlasný smysl. Uzavírají se nejen mezi cívkami, jak je to nakresleno, ale i oběma cívkami.

Rozptylový prostor je společný pro oba rozptylové toky, takže je nemůžeme při výpočtu oddělit; proto se reaktance rozptylové indukčnosti počítá najednou pro celý transformátor a ne pro jednotlivá vinutí samostatně. Přepočítává se ihned na vstupní stranu.

Pro usnadnění výpočtu budeme předpokládat, že vnitřní cívka je vstupní cívkou s N_1 závity a že rozptylové pole má střední délku indukční čáry l_c (obr. 23b)

$$l_c = \frac{l_{c1} + l_{c2}}{2}$$

Reaktance rozptylové indukčnosti je dána vztahem

$$X_\sigma = \omega L_\sigma = 2\pi f L_\sigma$$

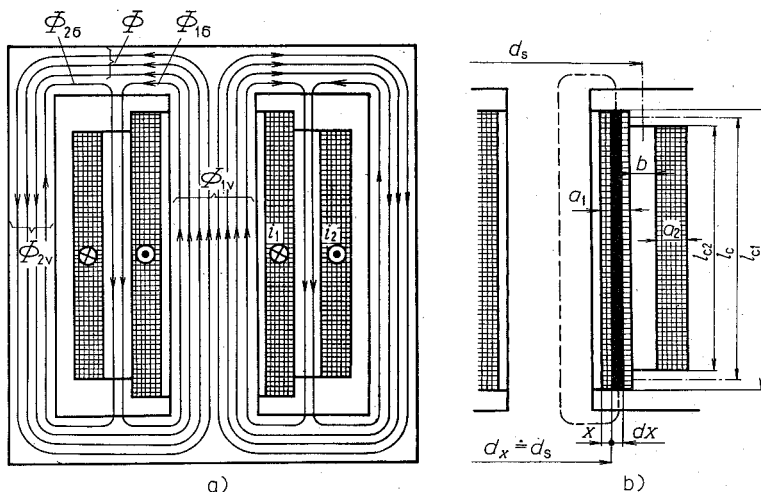
kde L_σ je náhradní rozptylová indukčnost, daná součinem $L_\sigma = N^2 \Lambda_\sigma$,
 Λ_σ magnetická vodivost rozptylových cest, sprážených s N závity.

Podle obr. 23 procházejí rozptylové indukční čáry třemi paralelně řazenými cestami:

- mezerou mezi cívkami šířky b ,
- vstupní cívkou šířky a_1 ,
- výstupní cívkou šířky a_2 ,

takže reaktance rozptylové indukčnosti je dána vztahem

$$X_{\sigma} = 2\pi f(L_{\sigma b} + L_{\sigma a1} + L_{\sigma a2})$$



Obr. 23. Reaktance transformátoru

a) průběh magnetických toků, b) rozměry pro výpočet reaktance

Jednotlivé náhradní rozptylové indukčnosti se vypočítají zvlášť a dosadí se do předchozí rovnice.

a) Pro mezeru mezi cívkami platí

$$L_{\sigma b} = N_1^2 \mu_0 \frac{\pi d_s b}{l_c}$$

jestliže je celý prostor spřažen s plným počtem závitů.

b) Elementární indukčnost naznačené indukční čáry je

$$dL_{\sigma a1} = \left(\frac{N_1}{a_1} x \right)^2 \mu_0 \frac{\pi d_x dx}{l_c}$$

kde výraz

$$\frac{N_1}{a_1} x$$

představuje počet závitů, s nimiž je příslušná indukční čára spřažena.

Jestliže budeme předpokládat, že $d_x \doteq d_s$, je indukčnost celého prostoru vstupní cívky dána vztahem

$$\begin{aligned} L_{\sigma a1} &= \frac{N_1^2}{a_1^2} \mu_0 \frac{\pi d_s}{l_c} \int_0^{a_1} x^2 dx = \frac{N_1^2}{a_1^2} \mu_0 \frac{\pi d_s}{l_c} \cdot \frac{a_1^3}{3} = \\ &= N_1^2 \mu_0 \frac{\pi d_s}{l_c} \cdot \frac{a_1}{3} \end{aligned}$$

c) Indukčnost prostoru výstupní cívky, přepočtená na vstupní počet závitů, je podobně

$$L_{\sigma a2} = N_1^2 \mu_0 \frac{\pi d_s}{l_c} \cdot \frac{a_2}{3}$$

Po dosazení a úpravě dostaneme

$$X_{\sigma} = 2\pi f N_1^2 \mu_0 \frac{\pi d_s}{l_c} \left(b + \frac{a_1 + a_2}{3} \right)$$

Po vyčíslení konstant bude reaktance celého transformátoru přepočtená na vstupní stranu

$$X_{\sigma} = 8f N_1^2 \frac{\pi d_s}{l_c} \left(b + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) \cdot 10^{-6} \quad [\Omega; \text{Hz, m}]$$

Jestliže mají cívky čtyřhranný profil, nahradíme v této rovnici výraz πd_s jejich středním obvodem O_c .

Uvedený postup a získaný výsledek jsou značně zjednodušeny, přesný výpočet reaktance pro různá uspořádání vinutí je uveden ve speciální literatuře.

2.10. ÚBYTEK NAPĚTÍ

Výstupní napětí odpovídající převodu transformátoru můžeme naměřit jen za chodu naprázdno. Tuto skutečnost vyjadřuje ve fázorovém diagramu na obr. 12b rovnost napětí U_1 a U_{21} .

Při zatížení je podle fázorového diagramu na obr. 19b výstupní napětí U_{21} menší než napětí U_1 o činné a reaktanční úbytky napětí ve stupním a výstupním vinutí. To znamená, že výstupní napětí U_2 při zatížení bude menší než výstupní napětí U_{20} při chodu naprázdno.

Toto snížení výstupního napětí při zatížení vzhledem k výstupnímu napětí při chodu naprázdno se nazývá úbytek napětí transformátoru a udává se v procentech jmenovitého napětí

$$\Delta u = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (69)$$

Číselně je možné vyjádřit ho poměrem

$$\Delta u = \frac{U_1 - U_{21}}{U_1} \cdot 100 \quad [\%] \quad (70)$$

Přesný výpočet úbytku napětí podle této rovnice by byl zdlouhavý. Pro praxi stačí jednoduchý výpočet, u něhož se zanedbává magnetizační i ztrátový proud.

Podle ČSN 35 1000 je při zatížení výkonem P , při napětí nakrátko $u_k \leq 4\%$, úbytek napětí dán vztahem

$$\Delta u = \frac{P}{P_n} (u_R \cos \varphi + u_x \sin \varphi) \quad [\%] \quad (71)$$

pro napětí nakrátko $u_k = (4 \text{ až } 20)\%$

$$\Delta u = \frac{P}{P_n} (u_R \cos \varphi + u_x \sin \varphi) + 0,005 \left(\frac{P}{P_n} \right)^2 (u_x \cos \varphi - u_R \sin \varphi)^2 \quad [\%] \quad (72)$$

Rovnice platí pro obvyklé indukční zatížení, pro kapacitní zatížení je třeba dosadit místo úhlu φ úhel $(-\varphi)$.

Průměrně bývá úbytek napětí u transformátoru asi 5%. Proto jmenovitá výstupní napětí transformátorů (naprázdno – udávaná na štítku) jsou o 5% vyšší než jmenovité napětí sítě, která je napájena. Např. pro síť $3 \times 380/220$ V je výstupní napětí transformátoru $3 \times 400/231$ V, pro síť 3×6000 V je výstupní napětí transformátoru 6300 V.

Při známém úbytku napětí je výstupní svorkové napětí dáno vztahem

$$U_2 = U_{20} \left(1 - \frac{\Delta u}{100} \right) \quad (73)$$

Příklad 4

Trojfázový transformátor s převodem 10 000/400/231 V a výkonem 30 kVA má podle norem napětí nakrátko 4,1 % a ztráty nakrátko 775 W. Vypočítejte úbytek napětí a svorkové napětí pro $\cos \varphi = 0,7$ indukční, 0,7 kapacitní a pro $\cos \varphi = 1$.

Poznámka. Podle nové ČSN 34 0160 z roku 1977 nazvané „Předpisy pro označení svorek a vodičů u elektrických předmětů a zařízení“ jsou svorky elektrických strojů a vodičů rozvodných soustav značeny odlišně. V tabulkách 2, 3, 4, 5 je porovnáno staré a nové značení.

Tabulka 2. Označení svorek výkonových transformátorů

Vinutí	Označení svorek			
	nové		staré	
vstupní				
pro 1. fázi	1U1	1U2	A1	A0
pro 2. fázi	1V1	1V2	B1	B0
pro 3. fázi	1W1	1W2	C1	C0
nulový bod	1N		N	
výstupní				
pro 1. fázi	2U1	2U2	a0	a1
pro 2. fázi	2V1	2V2	b0	b1
pro 3. fázi	2W1	2W2	c0	c1
nulový bod	2N		n	

2.11. TROJFÁZOVÝ TRANSFORMÁTOR

Podle ČSN 35 1009 z roku 1962 se označují začátky a konce vinutí jednofázových transformátorů spojených do trojfázové skupiny písmeny D1 – D0 bez označení fáze, aby byla možná vzájemná vyměnitelnost ve skupině.

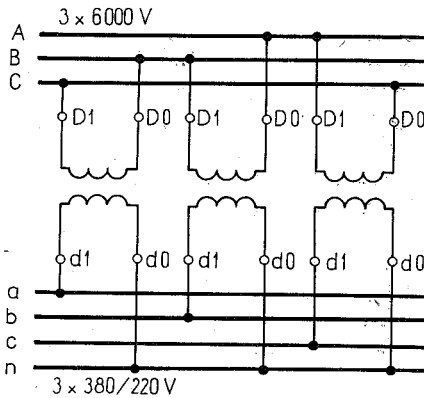
2.11.1. Úprava magnetického obvodu

Trojfázový transformátor můžeme sestavit ze tří jednofázových transformátorů, které zapojíme podle obr. 24.

Tak vznikají trojfázové skupiny velkých výkonů, neboť transformátor v jediné nádobě by byl značně velký a nebylo by možné ho dopravovat.

Tabulka 3. Označení svorek střídavých strojů

Vinutí	Označení svorek	
	nové	staré
statorové se třemi svorkami spojení do trojúhelníku spojení do hvězdy s vyvedeným nulovým bodem statorové se šesti svorkami pro 1. fázi pro 2. fázi pro 3. fázi	U V W U V W N U1 U2 V1 V2 W1 W2	A B C A B C N A A0 B B0 C C0
Trojfázové stroje		
rotorové vinutí se třemi kroužky rotorové vinutí se šesti kroužky pro 1. fázi pro 2. fázi pro 3. fázi buďící vinutí synchronního stroje	K L M K1 K2 L1 L2 M1 M2 F1 F2	a b c a a0 b b0 c c0 F1 F2
Jednofázové stroje		
hlavní vinutí pomocné vinutí	U1 U2 Z1 Z2	D D0 W W0



Obr. 24. Tři jednofázové transformátory zapojené do trojfázové skupiny

Tabulka 4. Označení svorek stejnosměrných strojů

Vinutí	Označení svorek			
	nové		staré	
kotvy	A1	A2	A1	A2
pomocných pólů	B1	B2	Q1	Q1
kompensační	C1	C2	K1	K2
sériové	D1	D2	S1	S2
derivační	E1	E2	D1	D2
cizího buzení	F1	F2	F1	F2

Na prvním místě je uvedeno označení vstupní svorky (začátku vinutí) a na druhém místě označení výstupní svorky (konce vinutí).

Tabulka 5. Označení vodičů napájecího vedení

Vodič	Označení svorek	
	nové	staré
Střídavá rozvodná soustava		
vodič 1. fáze	L1	R
vodič 2. fáze	L2	S
vodič 3. fáze	L3	T
Stejnoseměrná rozvodná soustava		
vodič kladného pólu	L+	+
vodič záporného pólu	L-	-
střední vodič	M	N
uzemněný ochranný vodič	PE	F
neuzemněný ochranný vodič	PU	F
nulovací vodič	PEN	Nn
pracovní uzemňovací vodič	E	
vodič k odrušené (bezšumové) zemi	TE	

Výhodou tohoto řešení je i to, že k zajištění plynulého provozu stačí jeden transformátor třetinového výkonu, a je tedy lacinější než trojfázový transformátor plného výkonu. I vzhledem k těmto výhodám je dnes snaha stavět

co nejuvonnější trojfázové transformátory v jedné nádobě a jejich dokonalou konstrukcí zajistit bezporuchový provoz i bez záložního transformátoru. Jeden trojfázový transformátor vychází o 15 až 25 % lehčí než skupina tří jednofázových transformátorů stejného výkonu.

Trojfázový transformátor normálního provedení má všechny tři fáze na jednom společném magnetickém obvodu, který bývá s jádrem v jedné rovině podle obr. 3c (tzv. rovinný trojfázový transformátor). Plášťový transformátor trojfázový podle obr. 3d je neobvyklý, stavějí ho ze zvláštních důvodů některé světové firmy. Jen magnetické obvody moderních trojfázových transformátorů velkých obvodů jsou odlišné konstrukce (čl. 2. 24.1).

2.11.2. Výpočet magnetizačního a ztrátového proudu

Pro trojfázové transformátory se udává výkon, ztráty ve vinutí nakrátko a ztráty v železe (naprázdno) pro celou trojfázovou jednotku.

Magnetizační proud trojfázového transformátoru podle (27) je

$$I_{\mu} = \frac{\Delta q_j m_j + \Delta q_s m_s}{3U_1} \quad [A; VA \text{ kg}^{-1}, \text{kg}, V] \quad (74)$$

Podobně i ztrátový proud je dán vztahem

$$I_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe}}{3U_1} \quad [A; W, V] \quad (75)$$

2.12. VINUTÍ TROJFÁZOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ

2.12.1. Způsoby kreslení

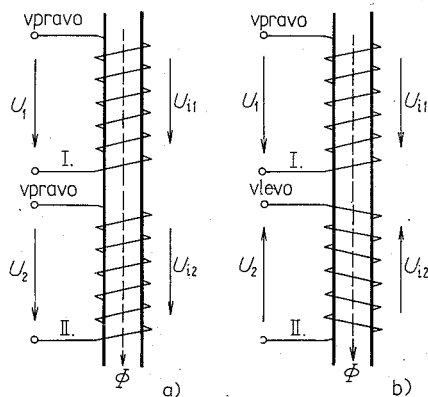
Na obr. 25a jsou nad sebou nakresleny dvě pravotočivé cívky, navinuté na společném jádře. Horní cívka představuje vstupní vinutí transformátoru, spodní představuje vinutí výstupní. Sledováním nakreslených smyslů napětí, magnetického toku a proudu si můžeme ověřit toto pravidlo:

U pravotočivé cívky je smysl svorkového napětí souhlasný se smyslem magnetického toku.

Pro kreslení schémat zapojení budeme vždy předpokládat, že cívky jsou pravotočivé, takže zvolený kladný smysl magnetického toku, který

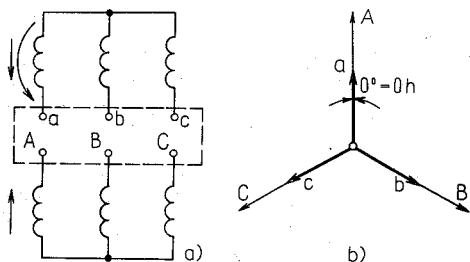
nakreslíme po straně vinutí, bude souhlasit s kladným smyslem svorkového napětí.

Na obr. 24b je výstupní cívka levotočivá. Svorkové napětí má opačný smysl než magnetický tok. Kombinaci pravotočivých a levotočivých cívek používáme tehdy, jestliže chceme dosáhnout fázového posunu 180° (mezi vstupním a výstupním napětím) při stejné poloze vývodů cívky. Vývod k průchodkám vyjde v horní části cívky, takže stačí kratší připojovací vodiče, ve kterých vznikají menší ztráty.



Obr. 25. Orientování napětí ve vinutí transformátoru
a) obě cívky pravotočivé,
b) výstupní cívka levotočivá

Vzájemná poloha vstupního a výstupního vinutí se kreslí podle ČSN 34 3270 – Obsluha transformátorů (obr. 26a). Poloha svorek odpovídá jejich skutečnému umístění na víku transformátoru. Vpředu se kreslí cívky vinutí na vyšší napětí, jejichž svorky jsou zleva doprava označeny A, B, C. Svorky vinutí pro nižší napětí jsou vzadu a jsou označeny a, b, c. Obě vinutí, původně svisle upravené, se pootočí



Obr. 26. Spojení Yy0
a) vinutí proti sobě natočená,
b) fázorový diagram napětí

do jedné roviny. Kladné smysly napětí, které jsou v obou vinutích souhlasné, se natočením orientují proti sobě tak, že směřují ke svorkám.

Tohoto způsobu kreslení budeme používat při zkoumání jednotlivých druhů zapojení.

2.12.2. Hodinový úhel

Trojfázová vinutí transformátorů můžeme spojovat do hvězdy (Y, y), do trojúhelníka (D, d) a do lomené hvězdy (z). Lomená hvězda se používá jen u výstupního vinutí nn. Velkým písmenem se označuje zapojení vinutí pro vyšší napětí. Vstupní a výstupní vinutí transformátoru nemusí mít stejné zapojení.

Charakteristickým údajem o zapojení vinutí trojfázového transformátoru je *hodinový úhel*.

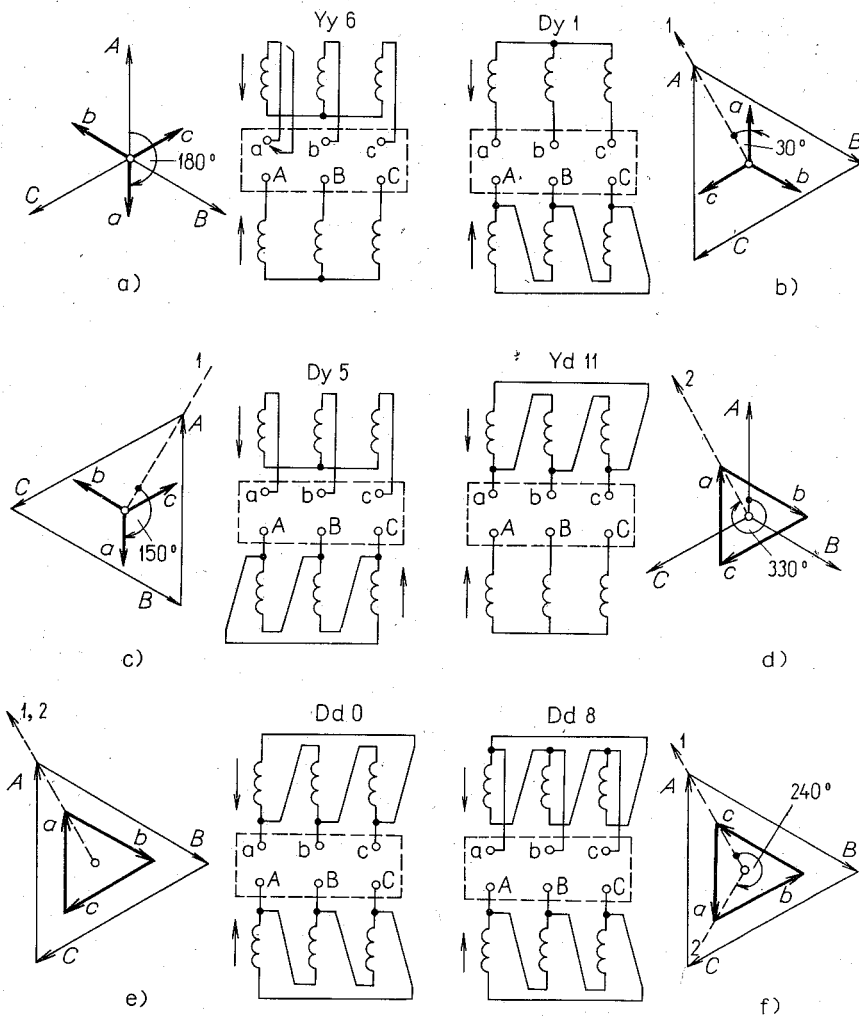
Udává fázový posun mezi fázorem vstupního a výstupního napětí v hodinách, přičemž úhel 30° představuje jednu hodinu. Udává vždy zpoždění výstupního napětí za vstupním napětím.

Hodinový úhel zapojení podle obr. 26b se určuje takto: Po straně vinutí se nakreslí šipky, které odpovídají kladnému smyslu magnetického toku a tím i svorkovému napětí. Vstupní napětí tvoří fázorovou hvězdu A, B, C. Výstupní napětí a směřuje od uzlu 0 ke svorce a souhlasně s nakresleným kladným smyslem, takže jeho fázor je ve fázi s fázorem vstupního napětí A. Podobně jsou i výstupní napětí fází b a c ve fázi se vstupními napětími fází B a C. Hvězda fázorů vstupních napětí splývá s hvězdou fázorů výstupních napětí. Mezi fázory stejné fáze není fázový posun, takže jde o hodinový úhel rovnající se nule. Nakreslené zapojení se označuje Yy0. Číslo za symboly zapojení udává hodinový úhel.

2.12.3. Příklady různých zapojení

Příklady jsou vyznačeny na obr. 27 spolu s konstrukcí fázorového diagramu.

Při kreslení fázorových trojúhelníků se musí jednotlivé fázory uzavírat v tom smyslu, v jakém jsou jednotlivé fáze vinutí za sebou zapojeny do trojúhelníka. U trojúhelníka rozhoduje o hodinovém úhlu pomocný paprsek, vedený z těžiště k příslušnému vrcholu. Hvězda fázorových napětí se kreslí do těžiště trojúhelníka fázorů napětí.



Obr. 27. Různá zapojení trojfázových transformátorů a určení jejich hodinového úhlu

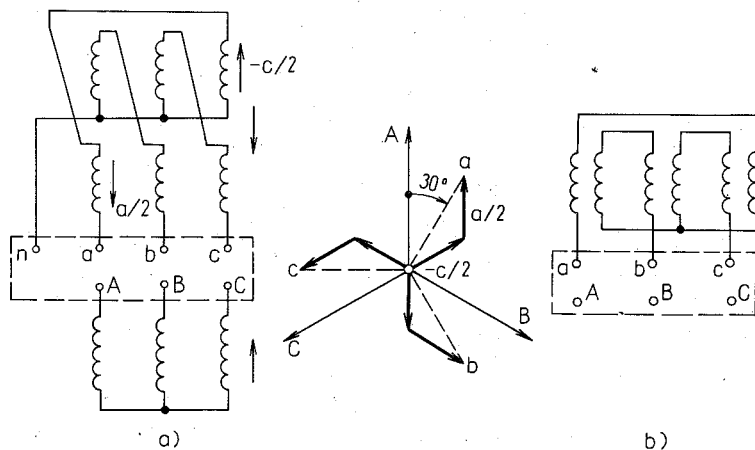
2.12.4. Zapojení do lomené hvězdy

Při zapojení do lomené hvězdy (z), která se používá jen na straně nízkého napětí, je vinutí každé fáze rozděleno na dvě stejné cívky, upravené na dvou sloupech magnetického obvodu, které patří dvěma různým fázím.

Schéma nejobvyklejšího zapojení Yz1 je na obr. 28. Ze schématu je vidět, že obě poloviny cívky každé fáze jsou zapojeny proti sobě a výsledné výstupní napětí je vždy dáno fázorovým součtem kladného napětí jedné poloviny a záporného napětí druhé poloviny cívky.

Příklad 5

Nakreslete zapojení Yz 11 a jeho fázorový diagram.



Obr. 28. Zapojení do lomené hvězdy Yz1
a) určení hodinového úhlu, b) kreslení podle ČSN 34 3270

2.13. POSOUZENÍ JEDNOTLIVÝCH ZAPOJENÍ

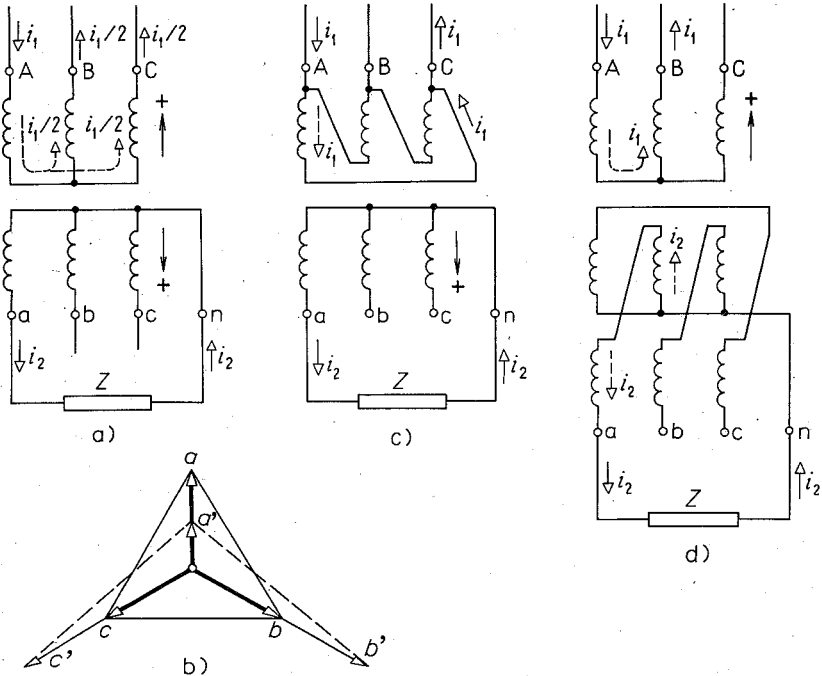
2.13.1. Zapojení Yy

Výhody:

- a) jednoduchá výroba,
- b) pro požadované napětí je třeba nejmenší počet závitů,
- c) vzhledem k malému počtu závitů, popř. menšímu prostoru pro izolaci, vyjdou cívky menší,
- d) vinutí je příznivě elektricky namáháno, neboť napětí je rovnoměrně rozloženo po celé délce vinutí, takže plné napětí je jen na jeho začátku,

e) při souměrném zatížení má uzel vinutí proti zemi nulové napětí,
 f) jestliže se na výstupní straně vyvede uzel vinutí, dává transformátor dvě napětí, např. 400 a 231 V.

Uzel se vyvádí jen na straně nízkého napětí. Pro vinutí vn se uzel zpravidla nevyvádí a neuzemňuje. U neuzemněného uzlu vn je možné udržet síť v provozu i při poruše, která vznikne na jedné fázi. Vinutí vvn transformátorů mají uzel z několika důvodů uzemněný.



Obr. 29. Vliv jednofázového nesouměrného zatížení

a) spojení Yy, b) deformace napětí při nesouměrném zatížení při spojení Yy, c) spojení Dy, d) spojení Yz

Jestliže je uzel vinutí vn izolován, je zapojení Yy velmi citlivé na nesouměrné zatížení (obr. 29a).

Jak vyplývá z nakreslených smyslů platných pro určitý okamžik, musí se primární proud i_1 , úměrný sekundárnímu zatížení i_2 , vracet do primárního zdroje přes vinutí ostatních dvou fází, do kterých se

rovnoměrně rozdělí. Proudů v těchto dvou nezatížených fázích jsou jen magnetizační, přibuzují jádro a jsou příčinou zvýšení napětí v nezatížených fázích. To vede ke značné deformaci fázorové hvězdy napětí, k níž přispívá i pokles napětí zatížené fáze vlivem úbytku napětí (obr. 29b).

Vliv nesouměrného zatížení může potlačit pomocné vyrovnávací vinutí (terciární), zapojené do trojúhelníka. Tímto vinutím se vybavují větší transformátory s hlavním vinutím zapojeným do Yy.

Transformátor se třetím vinutím se označuje Yy0/d. Terciární vinutí pracuje jen jako vyrovnávací vinutí nebo i napájí zvláštní síť. V takovém případě transformátor spojuje tři sítě s různým jmenovitým napětím, např. 100, 22 a 6 kV. Poměr výkonů jednotlivých vinutí bývá 1 : 1 : (0,4 až 0,75).

Zapojení Yy bez vyrovnávacího vinutí můžeme použít pouze tehdy, jestliže vyrovnávací proud v nulovém vodiči, vyvolaný nesouměrným zatížením, nepřekročí 20 % jmenovitého proudu.

2.13.2. Zapojení Dy

Vstupní vinutí zapojené do trojúhelníka působí jako vyrovnávací a potlačuje vliv nesouměrného zatížení (obr. 28c). Používá se jen pro větší výkony (asi nad 400 kVA), jestliže je nulovací vodič vyveden a zatížen.

Pro menší výkony je toto zapojení nevhodné, neboť musí mít větší počet závitů, odpovídající sdruženému napětí, takže se větší prostor zaplní izolací.

2.13.3. Zapojení Yd

Nepotřebuje vyrovnávací vinutí. Používá se u transformátorů, které napájejí hlavní rozvodné síť.

2.13.4. Zapojení Dd

Používá se u trojfázové skupiny složené ze tří jednofázových transformátorů. Při poruše jednoho z transformátorů můžeme zbývající dva spojit podle obr. 31. Tím vznikne trojfázová soustava, kterou můžeme zatížit menším výkonem, a tak alespoň částečně udržet síť v provozu. Potom jde o zapojení Vv.

2.13.5. Zapojení Yz

Lomená hvězda se používá do výkonu 315 kVA u transformátorů, které napájejí sekundární síť s nesouměrným zatížením větším než 20 % jmenovitého proudu.

Fázová napětí se u tohoto zapojení nedeformují ani při značném nesouměrném zatížení (obr. 29d).

Nevýhodou zapojení do lomené hvězdy je větší spotřeba vodičů. Jednotlivé půlcívky výstupního vinutí musí mít víc závitů, než by odpovídalo polovičnímu fázovému napětí, neboť jejich napětí jsou proti sobě časově posunuta a sčítají se geometricky.

Příslušný fázorový diagram odpovídající zapojení Yz1 je na obr. 30. Fázové napětí U_f je tvořeno dvěma napětími U_c . Mezi fázory napětí U_f a U_c je úhel 30° .

Jedna fáze u obyčejné hvězdy by měla N_y závitů, kterým odpovídá napětí U_f . Lomená hvězda má N_z závitů, přičemž $N_z/2$ závitů odpovídá napětí U_c .

$$N_y \sim U_f \quad \frac{N_z}{2} \sim U_c$$

Z vyšrafovaného trojúhelníka plyne

$$\frac{U_f}{\frac{U_c}{2}} = \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (76)$$

nebo

$$\frac{U_c}{U_f} = \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{\frac{N_z}{2}}{N_y} = \frac{N_z}{2N_y}$$

a z toho

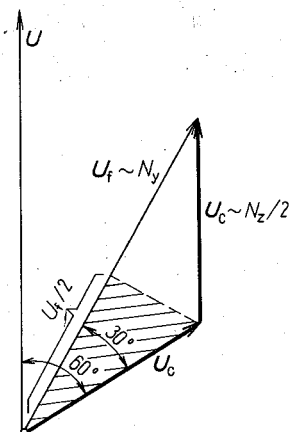
$$\frac{N_z}{N_y} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1,155 \quad (77)$$

Pro lomenou hvězdu je třeba o 15,5 % více závitů než pro obyčejnou hvězdu.

S tím je potřeba počítat při návrhu vinutí a při výpočtu převodu

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{\frac{N_2}{1,155}} \quad (78)$$

I při větším počtu závitů je toto spojení hospodárnější než spojení Dy nebo Yy(d).



Obr. 30. Výpočet zvětšení počtu závitů při spojení do lomené hvězdy

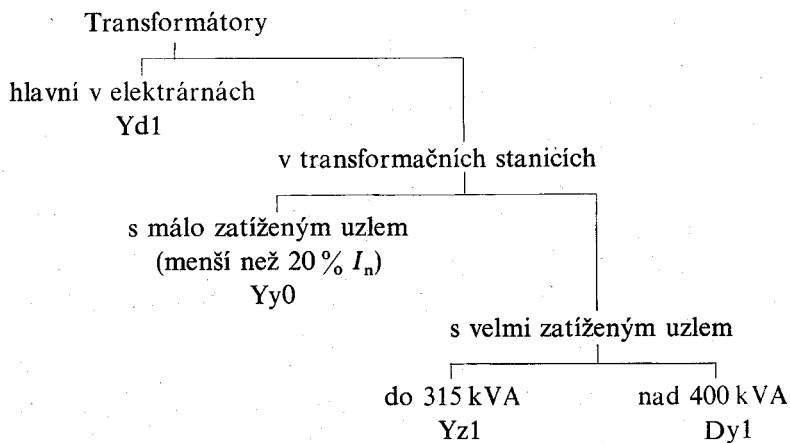
2.13.6. Používaná zapojení

Z velkého množství možných zapojení s různým hodinovým úhlem se obvykle používají pouze tato

Yy0 Yz1 Yd1 Dy1

Jiné hodinové úhly se používají jen tam, kde nový transformátor má paralelně spolupracovat s transformátorem starým.

Použití jednotlivých zapojení ukazuje následující přehled

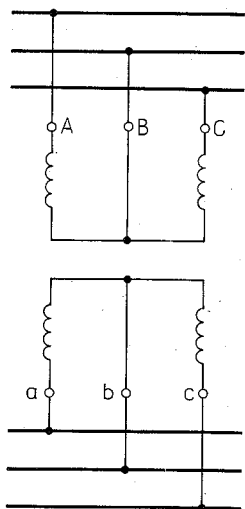


2.14. ZVLÁŠTNÍ ZAPOJENÍ

2.14.1. Zapojení V

Tímto zapojením můžeme při zmenšeném výkonu udržet v provozu trojfázovou skupinu složenou ze tří jednofázových transformátorů ($3 \times Dd$) při poruše jednoho z nich (obr. 31).

Kromě toho se takto zapojují dva měřicí transformátory napětí při měření v trojfázové soustavě.



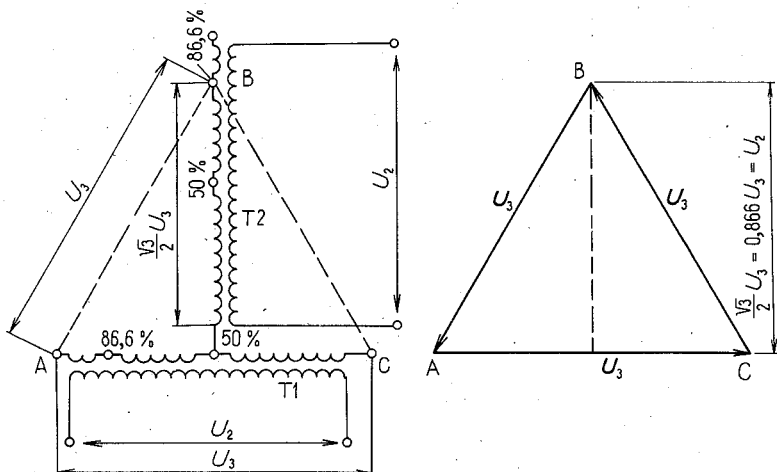
Obr. 31. Spojení Vv. Nouzové zapojení dvou jednofázových transformátorů pro odběr trojfázového proudu

2.14.2. Zapojení T

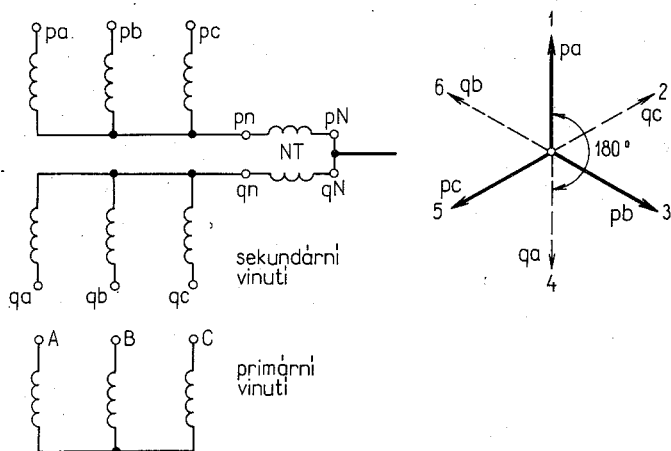
Používá se tzv. Scottovo zapojení, které slouží k přeměně dvoufázové soustavy na trojfázovou nebo naopak. Zapojení se skládá ze dvou jednofázových transformátorů s převodem U_3/U_2 , kde U_3 je sdružené napětí trojfázové soustavy a U_2 napětí dvoufázové soustavy. Primární vinutí obou transformátorů jsou zapojena do T podle obr. 32. Aby napětí U_2 obou transformátorů byla stejná, musí mít vstupní vinutí transformátoru T2 počet závitů úměrný napětí $U_3 \cos 60^\circ = 0,866 U_3$, jak je to zřejmé z obr. 32.

Obvykle použijeme dva stejné transformátory s odbočkami na 50 % a 86,6 %.

Scottovo zapojení se obvykle používá pro napájení dvou jednofázových úseků elektrické trati z trojfázové sítě. Pokud je zatížení úseků stejné, je trojfázová soustava zatížená ve všech třech fázích rovnoměrně. Ze stejného důvodu se používá Scottovo zapojení např. pro napájení jednofázových obloukových pecí.



Obr. 32. Scottovo zapojení



Obr. 33. Šestifázové zapojení s nulovou tlumivkou Yy(0-6)

2.14.3. Mnohofázová zapojení

Pro různé účely (např. pro napájení usměrňovačů) se musí používat mnohofázové soustavy. K tomu je možné použít trojfázový transformátor, jehož sekundární vinutí je vhodně děleno a pospojováno. Například pro napájení šestiúhlového usměrňovače se používá transformátor v zapojení Yy (0–6). Jeho výstupní vinutí tvoří dvě hvězdy pootočené proti sobě o 180° (6 hodin), obr. 33. Pro lepší využití transformátoru nebývají uzly obou hvězd spojeny přímo, ale přes tzv. nulovou tlumivku NT, která může být umístěna mimo transformátor, nebo přímo v jeho nádobě (obr. 49).

2.15. PARALELNÍ CHOD TRANSFORMÁTORŮ

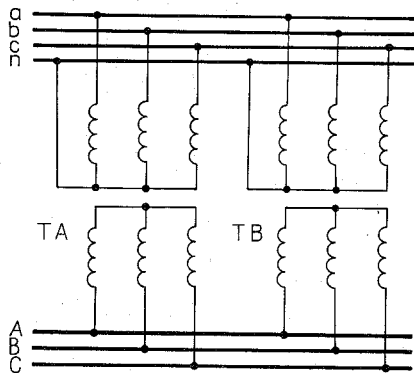
2.15.1. Význam a podmínky

Transformátory pracují paralelně tehdy, jestliže jsou připojeny na společnou síť a pracují na společné přípojnice (obr. 34).

Aby transformátory mohly pracovat paralelně, musí mít:

1. stejné jmenovité napětí vstupní i výstupní,
2. stejný převod,
3. přibližně stejné napětí nakrátko,
4. stejný hodinový úhel (jestliže jde o trojfázové transformátory).

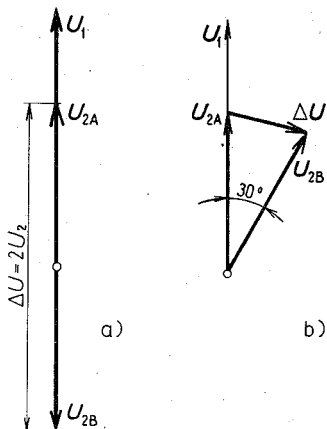
Při nestejném převodu je mezi výstupními napětími paralelně zapojených transformátorů rozdíl napětí, který způsobuje, že vinutími těchto



Obr. 34. Paralelní spojení dvou transformátorů

transformátorů prochází určitý vyrovnávací proud. Tento proud může být dost velký, neboť impedance transformátorů jsou poměrně malé.

Podle ČSN 35 1000 je dovolená nejvyšší tolerance převodu $\pm 0,5\%$. Tím je velikost vyrovnávacího proudu mezi transformátory omezena na (5 až 10)% jmenovitého proudu nejmenšího výkonu spolupracujících transformátorů.



Obr. 35. Rozdíl napětí mezi souhlasnými svorkami dvou transformátorů s nestejným hodinovým úhlem

Při nestejném hodinovém úhlu vzniká také rozdíl mezi okamžitými hodnotami výstupních napětí, který je příčinou značně velkých vyrovnávacích proudů. Největší vyrovnávací proud odpovídá rozdílu v hodinovém úhlu 6 hodin (obr. 35a), kdy je mezi výstupními svorkami spolupracujících transformátorů dvojnásobné napětí. I při nejmenším rozdílu, tzn. 1 hodina, (obr. 35b) je rozdíl napětí ΔU tak velký, že transformátory prochází až 25 % proudu nakrátko.

Z toho plyne, že transformátory s nestejným hodinovým úhlem nemůžeme vůbec paralelně spojovat. (Pouze v některých zvláštních případech.)

Při nestejném napětí nakrátko mohou být transformátory spolu spojeny, ale zatížení se rozdělí neúměrně k jejich jmenovitým výkonům. Transformátor s menším napětím nakrátko převezme větší část zatížení. Aby nebyl přetížen, nesmí se skupina zatížit plným výkonem, který odpovídá součtu jmenovitých výkonů jednotlivých transformátorů.

Podle ČSN 34 3270 je dovolená tolerance napětí nakrátko 10%. Transformátor s nižším napětím nakrátko u_k má vnitřní odpor menší

než transformátor s větším napětím nakrátko. Při zatížení jmenovitým proudem by v něm vznikaly nižší úbytky napětí a jeho výstupní napětí by bylo vyšší. Jsou-li výstupní svorky transformátorů paralelně spojeny, musí na nich být stejné napětí, a proto musí v transformátoru s nižším napětím nakrátko u_k vznikat vyšší úbytky napětí než v transformátoru, který má vyšší napětí nakrátko. Vyšší úbytky napětí však může vyvolat jen větší proud, kterému odpovídá i větší zatížení.

2.15.2. Rozdělení zatížení na paralelně zapojené transformátory

Na obr. 36 jsou dva transformátory zapojené paralelně (TA, TB). Jejich jmenovité výkony jsou P_{nA} , P_{nB} , napětí nakrátko u_{kA} , u_{kB} , vnitřní impedance Z_A , Z_B . Jmenovitým výkonům odpovídají jmenovité výstupní proudy I_{nA} , I_{nB} . Skupina je zatížena společným výkonem P , který se rozdělí na jednotlivé transformátory P_A , P_B , kterým zase odpovídají zatěžovací proudy I_A , I_B .

Aby výstupní napětí obou transformátorů byla stejná, musí v obou vznikat stejné úbytky napětí, takže musí platit vztah

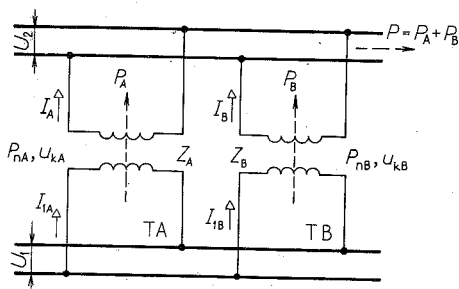
$$I_A Z_A = I_B Z_B \quad (79)$$

Impedance vyjádříme pomocí napětí nakrátko, která jsou při počítání na výstupní straně dána výrazy

$$u_{kA} = \frac{I_{nA} Z_A}{U_2} \cdot 100 \quad u_{kB} = \frac{I_{nB} Z_B}{U_2} \cdot 100$$

takže

$$Z_A = \frac{u_{kA} U_2}{I_{nA} \cdot 100} \quad Z_B = \frac{u_{kB} U_2}{I_{nB} \cdot 100}$$



Obr. 36. Odvození poměrů při paralelním spojení dvou transformátorů s nestejným hodinovým úhlem

a po dosazení do (79) dostaneme

$$I_A \frac{u_{kA} U_2}{I_{nA} 100} = I_B \frac{u_{kB} U_2}{I_{nB} 100}$$

Po úpravě dělíme obě strany napětím U_2 a dostaneme

$$u_{kA} \frac{I_A U_2}{I_{nA} U_2} = u_{kB} \frac{I_B U_2}{I_{nB} U_2}$$

Výrazy nad zlomkovou čarou představují zatížení jednotlivých transformátorů P_A a P_B , výrazy ve jmenovateli jsou jejich jmenovité výkony P_{nA} a P_{nB} .

Základní vztah pro rozdělení zatížení je tedy

$$u_{kA} \frac{P_A}{P_{nA}} = u_{kB} \frac{P_B}{P_{nB}} \quad (80)$$

a) Rozdělení zatížení při stejném napětí nakrátko

Z rovnice (80) vyplývá pro $u_{kA} = u_{kB}$

$$\frac{P_A}{P_{nA}} = \frac{P_B}{P_{nB}}$$

a z toho

$$\frac{P_A}{P_B} = \frac{P_{nA}}{P_{nB}} \quad (81)$$

Při stejných napětích nakrátko se zatížení skupiny rozdělí na jednotlivé transformátory úměrně jejich jednotlivým výkonům.

b) Rozdělení zatížení při stejných jmenovitých výkonech jestliže $P_{nA} = P_{nB}$. Z rovnice (80) vychází

$$u_{kA} P_A = u_{kB} P_B$$

a z toho

$$\frac{P_A}{P_B} = \frac{u_{kB}}{u_{kA}} \quad (82)$$

Při stejných jmenovitých výkonech se zatížení skupiny rozdělí na jednotlivé transformátory nepřímo úměrně jejich napětím nakrátko. Transformátor s nižším napětím nakrátko u_k převezme větší část zatížení než transformátor s vyšším napětím nakrátko.

c) Rozdělení zatížení při nestejných výkonech a nestejných napětích nakrátko.

Zatížení transformátorů můžeme vypočítat z rovnice (80), řešíme-li ji pomocí rovnice

$$P = P_A + P_B \quad (83)$$

kde P je společné zatížení skupiny.

Do rovnice (80) dosadíme

$$P_B = P - P_A$$

takže

$$\begin{aligned} u_{kA} \frac{P_A}{P_{nA}} &= u_{kB} \frac{P - P_A}{P_{nB}} \\ u_{kA} \frac{P_A}{P_{nA}} &= u_{kB} \frac{P}{P_{nB}} - u_{kB} \frac{P_A}{P_{nB}} \\ P_A \left(\frac{u_{kA}}{P_{nA}} + \frac{u_{kB}}{P_{nB}} \right) &= P \frac{u_{kB}}{P_{nB}} \end{aligned}$$

a z toho

$$\begin{aligned} P_A &= \frac{P \frac{u_{kB}}{P_{nB}}}{\frac{u_{kA}}{P_{nA}} + \frac{u_{kB}}{P_{nB}}} = \frac{P \frac{u_{kB}}{P_{nB}}}{\frac{u_{kA}P_{nB} + u_{kB}P_{nA}}{P_{nA}P_{nB}}} = \\ &= \frac{P u_{kB} P_{nA}}{u_{kA} P_{nB} + u_{kB} P_{nA}} = \frac{P}{\frac{u_{kA}}{u_{kB}} \frac{P_{nB}}{P_{nA}} + \frac{u_{kB}}{u_{kB}} \frac{P_{nA}}{P_{nA}}} P_{nA} \end{aligned}$$

Dělíme-li čitatele i jmenovatele napětím nakrátko u_{kA} , dostaneme po úpravě vztah pro zatížení jednotlivých transformátorů

$$P_A = \frac{P}{\frac{P_{nA}}{u_{kA}} + \frac{P_{nB}}{u_{kB}}} \cdot \frac{P_{nA}}{u_{kA}} \quad (84)$$

a podobně

$$P_B = \frac{P}{\frac{P_{nA}}{u_{kA}} + \frac{P_{nB}}{u_{kB}}} \cdot \frac{P_{nB}}{u_{kB}} \quad (85)$$

nebo jednoduše

$$P_B = P - P_A \quad (86)$$

Při paralelním zapojení několika transformátorů je zatížení libovolného transformátoru

$$P_x = \frac{P}{\frac{P_{nA}}{u_{kA}} + \frac{P_{nB}}{u_{kB}} + \dots} \cdot \frac{P_{nx}}{u_{kx}} \quad (87)$$

Příklad 6

Paralelně spolupracují dva transformátory

$$P_{nA} = 100 \text{ kVA}; \quad u_{kA} = 4\%$$

$$P_{nB} = 300 \text{ kVA}; \quad u_{kB} = 5\%$$

Jak se na ně rozdělí společné zatížení $P = 400 \text{ kVA}$? (Výsledek: $P_A = 118 \text{ kVA}$, transformátor je přetížen, $P_B = 282 \text{ kVA}$.) Z příkladu je vidět, že danou skupinu nelze zatížit plným výkonem 400 kVA .

Příklad 7

Jak se rozdělí zatížení 300 kVA na dva paralelně zapojené transformátory se stejným napětím nakrátko, jestliže jejich jmenovité výkony jsou 100 kVA a 250 kVA ?

(Výsledek: $P_A = 86 \text{ kVA}$,

$$P_B = 214 \text{ kVA}.)$$

2.16. ŘÍZENÍ NAPĚTÍ TRANSFORMÁTORŮ

2.16.1. Význam

Výstupní napětí síťových transformátorů musíme řídit proto, abychom vykompenzovali úbytky napětí i při proměnlivém zatížení. Napětí můžeme řídit změnou počtu vstupních nebo výstupních závitů.

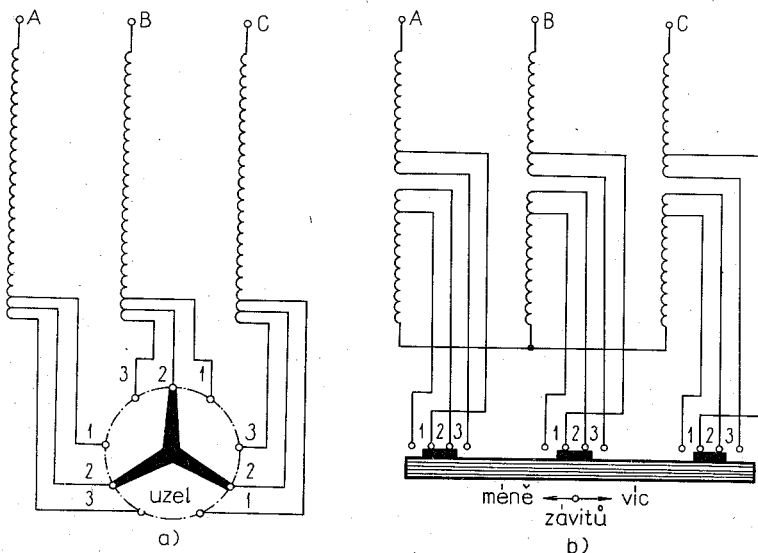
Řízení na vstupní straně (vn) je výhodnější, neboť při větším počtu závitů je řízení jemnější. Přepínací kontakty mají menší průřez, neboť vedou menší proud. Nevýhodou je změna magnetického toku způsobená změnou počtu závitů. Tím vzniká nestejně zatížení a využití aktivního průřezu jádra.

Zmenšováním počtu vstupních závitů se výstupní napětí zvyšuje.

Při menším počtu vstupních závitů a při nezměněném vstupním napětí podle rovnice $U_1 = 4,44\Phi f N_1$ je magnetický tok větší, a tím se ve výstupním vinutí indukuje vyšší napětí.

Při řízení na výstupní straně (nn) je magnetický tok při každém počtu sekundárních závitů stále stejný, železo je plně využito, ale řízení je méně výhodné, neboť se dá uskutečňovat jen v hrubých skocích (malý počet výstupních závitů). Přepínač musí být vzhledem k velkým proudům masivní a rozměrný.

Zmenšováním počtu výstupních závitů se výstupní napětí snižuje.



Obr. 37. Přepínání závitů

a) v uzlu, s porušením souměrnosti vinutí, b) uprostřed vinutí, bez porušení souměrnosti

2.16.2. Řízení napětí menších transformátorů

Transformátory do 1600 kVA mají předepsanou regulaci $\pm 5\%$ (ČSN 35 1000) na straně vn. Přepínač odboček je upraven na víku nádoby transformátoru. Vhodná odbočka se nastaví před uvedením transformátoru do chodu podle délky napájené sítě nebo podle skutečné hodnoty vstupního napětí, které může být různé podle poměrů v síti.

Výstupní jmenovité napětí běžných síťových transformátorů, které napájejí světelné sítě, je 400/231 V.

Na štítku se uvádějí vstupní napětí jednotlivých odboček, při nichž je na výstupní straně jmenovité napětí. Například transformátor s převodem

22 000/400/231 V má na štítku uvedeno

odbočka 3: 23 100 V

odbočka 2: 22 000 V

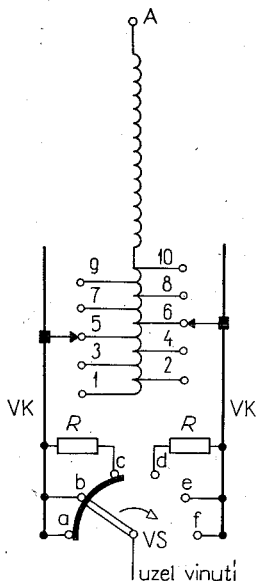
odbočka 1: 20 900 V

Nejjednodušší zapojení přepínače odboček do uzlu trojfázového vinutí je na obr. 37a. Přepínač je jednoduchý, jeho trojramenný přepínací kontakt tvoří uzel vinutí. Přepínáním odboček v uzlu se však přesouvá těžiště vinutí a při zkratu na něj působí nebezpečné axiální síly.

Aby se omezil vznik axiálních sil, musí mít větší transformátory přepínač uprostřed vinutí (obr. 37b). Tento přepínač je složitější, neboť musí mít jednotlivé kontakty izolovány. V poloze 3 jsou k hlavnímu vinutí připojeny obě regulační cívky, v poloze 2 je připojena jen jedna a v poloze 1 jsou obě regulační cívky vyřazeny.

2.16.3. Řízení napětí větších transformátorů

Transformátory větších výkonů (od 2000 kVA) mají \pm (8 až 9) napěťových stupňů odstupňovaných po 1,78 % nebo 2 % jmenovité hodnoty vyššího napětí (ČSN 35 1000). Jsou to tzv. říditelné transformátory a musí být možné přepnout jejich odbočky za provozu bez přerušení dodávky proudu.



Obr. 38. Jednoduchý odporový Jansenův přepínač odboček

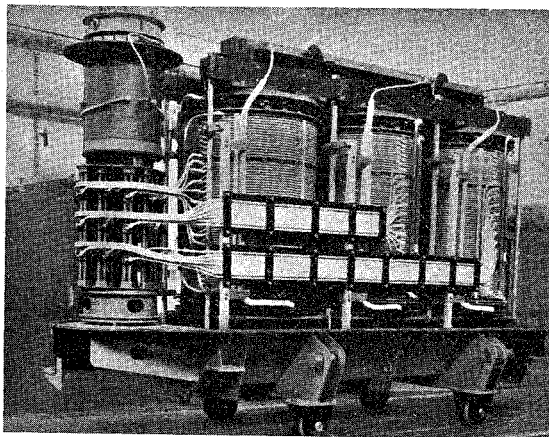
R – přepínací odpory, VK – voliče

odboček, VS – výkonový spínač,

a, f – kluzné kontakty výkonového spínače,

b, c – opalovací kontakty výkonového spínače,

c, d – kontakty přepínacích odporů



Obr. 39. Říditelný transformátor, Škoda n. p., Plzeň, 25 MVA, $110 \pm 2\%/23/6,3$ kV s Jansenovým přepínačem

Kdyby se cívka přepínala běžným kluzným přepínačem, byla by spojována nakrátko a procházel by jí značný proud. Aby se vyloučilo zkratování regulační cívky, musí mít odbočkový přepínač dva členy

1. volič, kterým se předem nastaví požadovaná odbočka,
2. výkonový spínač, který vykoná vlastní přepnutí bez přerušení proudu a bez zkratování cívky.

Přepínače mají různou konstrukci. Nejrozšířenější je odporový přepínač Jansenův (obr. 38).

Každá fáze má dva voliče odboček VK a jeden výkonový spínač VS, který po vykonané volbě odbočky připojí fázi na síť. Vyrovnávací proud mezi odbočkami je během přepínání omezen dvojicí přepínacích odporů R.

Vlastní přepínač je uložen v nádobě transformátoru (obr. 39) nebo má vlastní nádobu umístěnou vedle transformátoru.

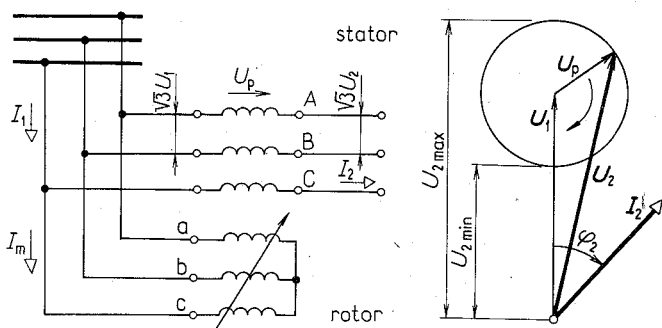
Odbočky se přepínají dálkově z dozorny prostřednictvím motorového pohonu. Je možné i nouzové ruční přepnutí zvláštní pákou. Aby se i při náhodném selhání motorového pohonu přepnutí ukončilo, má výkonový spínač momentové přepínání.

2.17. NATÁČIVÝ TRANSFORMÁTOR

Natáčivý transformátor (původní název indukční regulátor — booster) je zabrzděný trojfázový indukční stroj s vinutým (kroužkovým) rotorem, upraveným pro plynulé řízení napětí jednofázové nebo trojfázové soustavy napětí.

2.17.1. Jednoduchý natáčivý transformátor

Jeho zapojení je na obr. 40. Rotorové vinutí je paralelně připojeno k síti s fázovým napětím U_1 a statorové vinutí je se sítí zapojeno průběžně. Rotorové vinutí pracuje jako budicí (primární) a jeho točivé magnetické pole indukuje ve statorovém (řídícím) vinutí přídavné napětí U_p . To se vektorově sčítá s primárním napětím na výstupní říditelné napětí U_2 , odebírané z druhých svorek statorového vinutí. Velikost řídicího napětí je stálá, ale natáčením rotoru vzhledem ke statoru se mění jeho fázový posun, takže podle obr. 40 se mění výstupní napětí U_2 v rozsahu $U_1 - U_p$ až $U_1 + U_p$. Současně se mění i fázový posun výstupního napětí vzhledem k sekundárnímu proudu I_2 .



Obr. 40. Jednoduchý natáčivý transformátor

Rotor obvykle nemá kroužky, ale je připojen ohebnými vodiči, které dovolují jeho natáčení o příslušný úhel. Natáčí se samosvorným šroubovým převodem, který nedovolí, aby se účinkem točivého magnetického pole otáčel, ale umožňuje jen natáčení ručním kolečkem nebo pomocným motorem. Chladí se buď vzduchem (zvláštním ventilátorem), nebo olejem.

Na štítku natáčivého transformátoru se udává jeho vnější (průběžný) výkon

$$P = 3U_{2\max}I_2 \quad (88)$$

kde $U_{2\max}$ je maximální výstupní napětí při zatížení jmenovitým proudem a při jmenovitém účinníku, který musí být také uveden na štítku.

O velikosti natáčivého transformátoru rozhoduje jeho vnitřní (typový) výkon

$$P_i = 3U_p I_2 = 3(U_{2\max} - U_1)I_2 \quad (89)$$

Vztah mezi oběma výkony je podobný jako u autotransformátoru

$$P_i = 3 \frac{P}{3U_{2\max}} (U_{2\max} - U_1)$$

a po úpravě

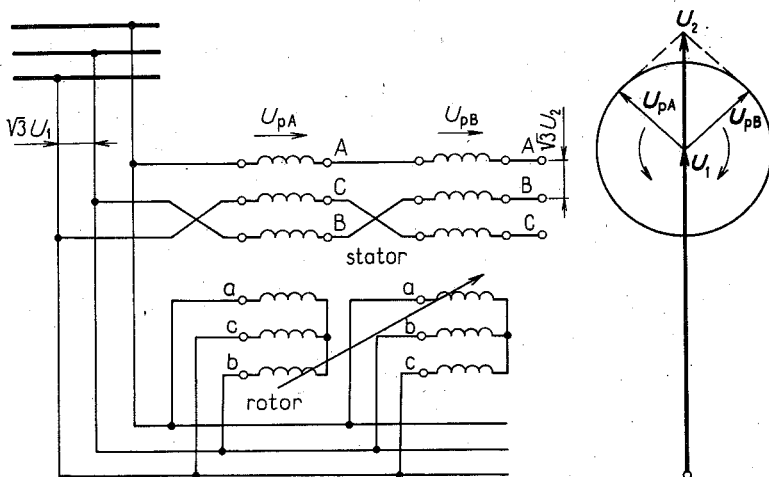
$$P_i = P \left(1 - \frac{U_1}{U_{2\max}} \right) \quad (90)$$

přičemž za proud I_2 dosadíme z rovnice (88)

$$I_2 = \frac{P}{3U_{2\max}}$$

2.17.2. Dvojitý natáčivý transformátor

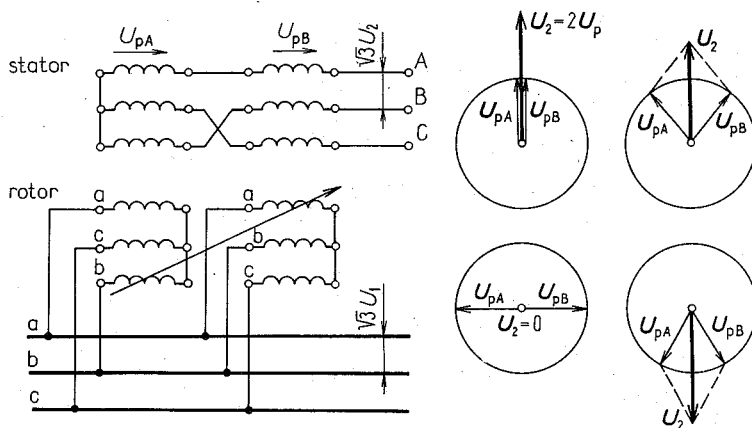
Změna fáze výstupního napětí není v některých případech přípustná a můžeme ji vyloučit dvojitým natáčivým transformátorem podle obr. 41. Jeho vinutí jsou elektricky uspořádána tak, že u prvního vinutí je pořadí fází



Obr. 41. Dvojitý natáčivý transformátor

ABC a u druhého vinutí ACB. Tím dosáhne toho, že přídavná napětí obou satorových řídicích vinutí U_{pA} a U_{pB} se při natáčení obou rotorů jedním směrem (jsou na jednom hřídeli) fázově natáčejí proti sobě.

Výsledné výstupní napětí U_2 je dáno vektorovým součtem obou přídavných napětí U_{pA} , U_{pB} se síťovým napětím U_1 . Z fázorového diagramu na obr. 41 je vidět, že poloha fázoru U_2 je stálá a fázový posun φ_2 se nemění.



Obr. 42. Zapojení dvojitého natáčivého transformátoru pro řízení napětí od nuly

Výstupní napětí můžeme měnit v rozsahu od $(U_1 - 2U_p)$ až do $(U_1 + 2U_p)$. Tam, kde se žádá řízení napětí od nuly do maxima v obou směrech, např. při řízení otáček komutátorových motorů, musíme dvojitý natáčivý transformátor zapojit podle obr. 42. Rozsah řízení je potom od nuly až do $\pm 2U_p$. Vnější výkon se rovná jen vnitřnímu výkonu ($P = P_i$).

Uvedené zapojení můžeme použít i tam, kde se má sekundární síť izolovat od primární.

2.18. ÚČINNOST TRANSFORMÁTORŮ

Účinnost transformátoru jako každého jiného stroje je dána poměrem výkonu a příkonu. Pro plné zatížení jmenovitým (štitkovým) výkonem P_n a pro $\cos \varphi = 1$ je účinnost

$$\eta = \frac{P_n - \Delta P_0 - \Delta P_k}{P_n} 100 \quad [%; \text{kVA, kW}] \quad (91)$$

Účinnost se mění se zatížením a účínkem. Podle ČSN 35 1000 se má (pokud není dohodnuto jinak), udávat pro 100 %, 75 % a 50 % jmenovitého výkonu a pro $\cos \varphi = 1$ a $\cos \varphi = 0,8$.

Pro dané zatížení zdánlivým výkonem P a pro účíník $\cos \varphi$ je účinnost

$$\eta = 100 - \frac{1}{\cos \varphi} \left(\Delta p_0 \frac{P_n}{P} + \Delta p_k \frac{P}{P_n} \right) \quad [\%] \quad (92)$$

kde Δp_0 jsou poměrné ztráty naprázdno,

Δp_k poměrné ztráty nakrátko.

Poměrné ztráty naprázdno

$$\Delta p_0 = \frac{\Delta P_0}{P_n} 100 \quad [\% ; \text{kW, kVA}] \quad (93)$$

Poměrné ztráty nakrátko

$$\Delta p_k = \frac{\Delta P_k}{P_n} 100 \quad [\% ; \text{kW, kVA}] \quad (94)$$

Není správné, aby transformátory byly předimenzované a trvale pracovaly s menším výkonem, než je jmenovitý výkon. Nejen že vykazují horší účinnost, ale zhoršují citelně i účíník primární sítě. To se zvláště nepříznivě projevuje v energetickém hospodaření velkých odběratelů s vlastními transformačními stanicemi, kde rozvodné závody měří spotřebu na primární straně. Výkon pomocných zařízení transformátoru (např. olejových čerpadel, chladičů apod.) se do výpočtu účinnosti transformátoru nezapočítává. Musí být ale uveden na štítku transformátoru.

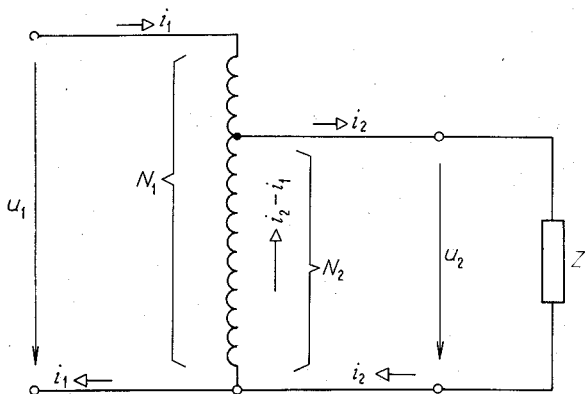
Příklad 8

Transformátor s výkonem 1000 kVA má ztráty naprázdno 4150 W a ztráty nakrátko 14 000 W. Jaká je jeho účinnost při zatížení 100 %, 75 %, 50 % a při účíníku 1 a 0,8.

2.19. AUTOTRANSFORMÁTOR

Autotransformátor je transformátor s jedním vinutím, zapojeným podle obr. 43. Vstupní napětí je připojeno na plný počet závitů N_1 , výstupní napětí se odebírá z odbočky, která má menší počet závitů N_2 . U zvyšovacího transformátoru je zapojení opačné.

Z nakreslených okamžitých smyslů proudů na obr. 43 je vidět, že u snížovacího transformátoru prochází částí vinutí, ze které se odebírá napětí U_2 , jen rozdíl proudů $i_2 - i_1$. Jeho průřez je tedy menší než průřez výstupního vinutí normálního transformátoru.



Obr. 43. Schéma
jednofázového
autotransformátoru

Protože autotransformátor má méně závitů a vodič má menší průřez, nazývá se *úsporný* transformátor. Je výrobně i provozně výhodnější než transformátor s oddělenými vinutími. *Úspora je tím větší, čím je rozdíl obou napětí menší, tedy čím více se převod transformátoru blíží jedné.* Kromě úspory vinutí je velkou výhodou autotransformátoru, že ho nemusíme navrhovat na plný průběžný výkon, ale na podstatně menší typový výkon, takže je rozměrově menší a levnější.

Průběžný výkon je dán vztahem

$$P = U_1 I_1 = U_2 I_2 \quad (95)$$

a udává se na štítku transformátoru.

Typový (vnitřní) výkon odpovídá rozdílu napětí ($U_1 - U_2$) pro snížovací transformátor nebo rozdílu napětí ($U_2 - U_1$) u zvyšovacího transformátoru. Pro $U_1 > U_2$ platí

$$P_i = I_1(U_1 - U_2) = \frac{P}{U_1}(U_1 - U_2)$$

a po úpravě

$$P_i = P \left(1 - \frac{U_2}{U_1} \right)$$

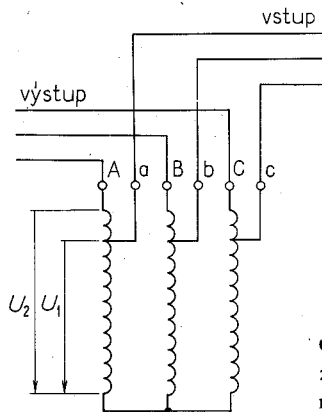
nebo obecně

$$P_i = P \left(1 - \frac{\text{menší napětí}}{\text{větší napětí}} \right) \quad (96)$$

Nevýhodou autotransformátoru je, že jeho vstupní strana je galvanicky spojena se stranou výstupní. Při náhodném přerušení vinutí se na výstupní svorky dostane plné vstupní napětí U_1 . Proto ho nemůžeme použít jako izolační transformátor mezi sítí vn a nn. Může se použít jen pro stejnou třídu napětí na obou stranách, např. pro spojení nadřazené soustavy 380 kV s vedením o napětí 231 kV, nebo v domácnostech pro převod napětí 220/110 V.

Autotransformátory se s oblibou používají ve velkých rozvodných sítích vvn ke zvyšování napětí na konci vedení nebo ke vzájemnému spojování sítí s různým napětím. Tyto transformátory bývají jednofázové nebo trojfázové. Schéma trojfázového zvyšovacího autotransformátoru je na obr. 44.

V síti vn a vvn je možné jediné spojení do hvězdy s terciárním vinutím spojeným do trojúhelníka.



Obr. 44. Schéma trojfázového zvyšovacího autotransformátoru na konci dlouhého vedení

S výhodou se autotransformátory používají k plynulému řízení napětí, např. pro střídavé lokomotivy s trolejovým vedením na napětí 25 kV nebo u menších výkonů jako sběračové transformátory k různým regulačním nebo laboratorním účelům (2.20.1).

Největší říditelný autotransformátor u nás vyrábí n. p. ČKD Praha. Jeho výkon je 220/250/100 MVA, převod $400/121 \pm 12\%/10$ kV, hmotnost 298 t, délka 21 m, výška s průchodkami 9,2 m, šířka 4 m.

Příklad 9

Jaký je průběžný a typový výkon zvyšovacího transformátoru, platí-li $U_1 = 300$ V, $I_1 = 10$ A a $U_2 = 500$ V.

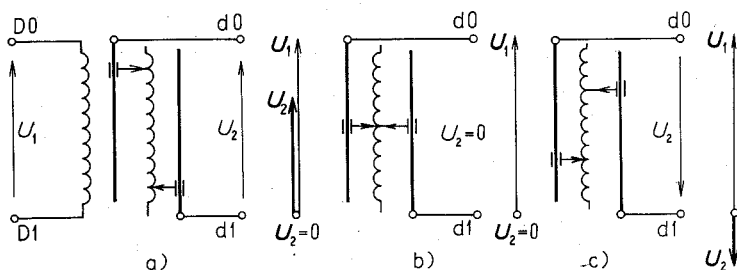
(Výsledek: $P = 3$ kVA, $P_i = 1,2$ kVA).

2.20. SPECIÁLNÍ TRANSFORMÁTORY

2.20.1. Sběračové transformátory

Jsou to transformátory pro malé výkony s mnohostupňovým téměř plynulým řízením napětí. Vyrábějí se jako jednofázové nebo trojfázové.

Výstupní vinutí je upraveno jen v jedné vnější vrstvě. Izolace vodičů se odstraní na dvou protilehlých pásech, po kterých kloužou dvě uhlíkové kladky. Kladky slouží k odběru proudu. Posouváním kladek proti sobě se mění velikost odebíraného napětí U_2 i jeho fáze (např. podle obr. 45).

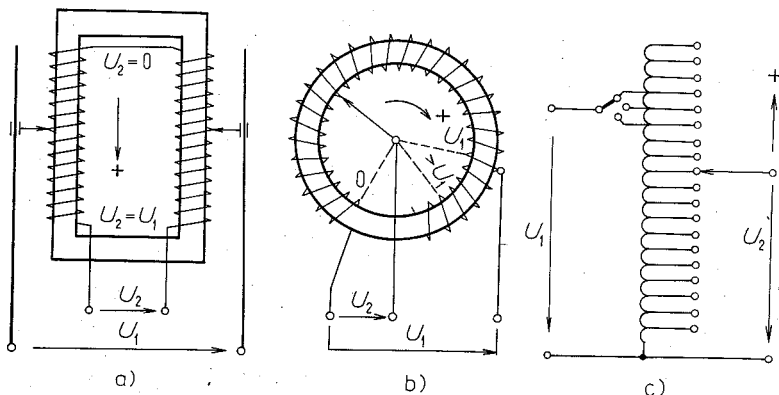


Obr. 45. Sběračový jednofázový transformátor s kladkami

Kladky spojují jednotlivé závitů nakrátko. Aby v nich nevznikl zkratový proud, musí být napětí na jeden závit menší, než je dvojnásobné přechodové napětí mezi vodičem a uhlíkovou kladkou. Přechodové napětí mezi mědí a běžným uhlíkem je 1,5 V, mezi mědí a bronzuhlíkovou kladkou asi 0,5 V. Napětí na jeden závit bývá asi 0,3 až 1,0 V.

Kladky se posouvají buď ručně pomocí řídicího kolečka, nebo dálkově pomocí zabudovaného motorku.

Velmi rozšířené jsou *sběračové autotransformátorky*. Pohyb sběracího kontaktu může být přímočarý nebo kruhový (obr. 46a, b). Zvláštním případem je tzv. dělič napětí. Je to autotransformátor s velkým počtem odboček, které umožňují řízení napětí od nuly až po síťové napětí, popř. i vyšší (obr. 46c).



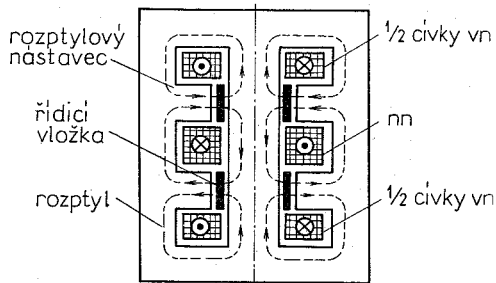
Obr. 46. Sběračový autotransformátor
a) s přímočarým posunem, b) kruhovým, c) dělič napětí

2.20.2. Rozptylové transformátory

Jsou to transformátory s úmyslně zvětšeným rozptylem, a tedy s *velkou vnitřní reaktancí*. Užívají se tam, kde jde o časté zkraty nebo kde se žádá značný pokles napětí už při jmenovitém proudu (např. při napájení výbojek).

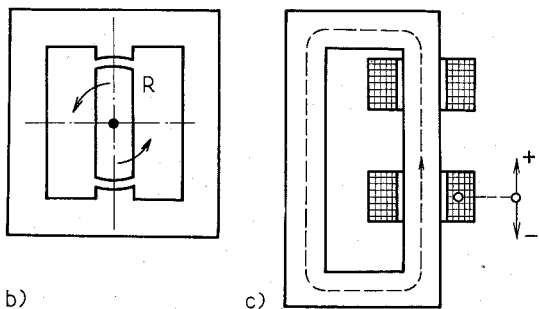
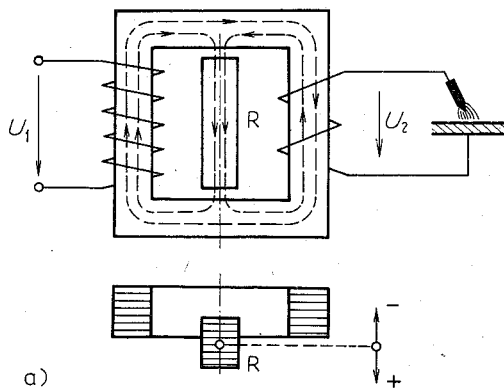
Pracovní napětí výbojek je nižší, než je jejich zapalovací napětí. Pokud je zapalovací napětí stejné jako napětí síťové, stačí výbojce předřadit tlumivku, která po zapálení výbojky svým úbytkem napětí na reaktanci sníží síťové napětí na potřebnou velikost, při níž je vývoj stabilní.

Jestliže je zapalovací napětí jiné než napětí sítě, můžeme s výhodou použít rozptylový transformátor. Jeho výstupní napětí naprázdno se nastaví tak, aby se rovnalo zapalovacímu napětí, a rozptyl se nastaví tak, aby při zatížení kleslo napětí vlivem reaktančního úbytku napětí na napětí pracovní.



Obr. 47. Rozptylový transformátor pro napájení výbojek

Obvyklé provedení je na obr. 47. Transformátor je plášťový, vinutí střídavé. Mezi cívkami jsou rozptylové nástavce, které zvětšují rozptylový magnetický tok. Vhodná vzduchová mezera se nastaví plechovými vložkami.



Obr. 48. Řízení svařovacího proudu
a) posouváním rozptylového jádra, b) natáčením rozptylového jádra, c) změnou vzdálenosti cívek

2.20.3. Svařovací transformátory

Při obloukovém svařování je k zapálení oblouku třeba napětí asi 70 V a k udržení oblouku napětí podstatně nižší, asi 25 V. Těmto proměnlivým pracovním podmínkám se samočinně přizpůsobuje opět rozptylový transformátor, který kromě toho udržuje poměrně stálý nastavený svařovací proud i při proměnné délce oblouku.

Zvětšení rozptylu dosáhneme větší vzdáleností mezi primárním a sekundárním vinutím a zvláštním rozptylovým jádrem. Rozptylové jádro je obvykle pohyblivé (natáčivé nebo výsuvné, obr. 48a, b), takže jím můžeme v jistých hranicích rozptyl měnit a tím nastavit pracovní proud. Pracovní proud můžeme nastavit i jiným způsobem, např. změnou vzdáleností obou vinutí (obr. 48c), nebo přepínáním odboček na primárním vinutí.

Transformátory pro odporové svařování jsou konstruovány na značné proudy (až několik stovek kiloampérů). Na sekundární straně mívají obvykle jen jeden masivní závit, uvnitř chlazený vodou. Proud se řídí odbočkami na primární straně.

2.20.4. Pecové transformátory

Slouží k napájení odporových nebo obloukových pecí pro tavení různých materiálů, především v metalurgii. Mají *nízké sekundární napětí* (25 až 500 V), ke kterému při velkých výkonech (do 60 MVA) odpovídají obrovské proudy. Abychom co nejvíce vyloučili přídavné ztráty v masivních vodičích vinutí a v přívodních pásech, musíme vinutí dělit na velký počet paralelních větví a přívody k výstupním průchodkám se musí střídat tak, aby byly vedle sebe vodiče s opačným směrem proudu. Každá paralelní větev je samostatně vyvedena na vlastní průchodky.

Aby se masivní vývody cívek daly realizovat, musí být tyto cívky zpravidla umístěny zvenku a cívky vysokého napětí uvnitř na jádře. U velmi velkých výkonů se volí transformátor plášťového typu s jádrem ve vodorovné poloze a se střídavým (kotoučovým) vinutím, u kterého vycházejí krátké vývody k průchodkám.

Pro dosažení co nejmenších zkratových proudů, které vznikají zejména v provozu obloukových pecí, mají pecové transformátory velké napětí nakrátko, až 20 %. Jestliže k omezení zkratových proudů nestačí reaktance

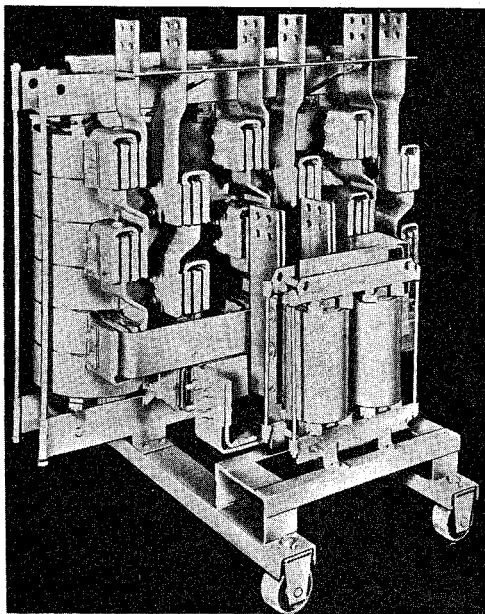
samotného vinutí, zapojí se do vstupního obvodu vhodná tlumivka. Zhoršený účinek se vykompenzuje kondenzátory.

Řízení výstupního napětí se obvykle požaduje v širokém rozsahu. Pokud stačí řízení bez zátěže, použije se jednoduchý přepojovač odboček na primární straně. Většinou se však žádá jemné řízení při plném výkonu, a to zejména u velkých výkonů ovlivňuje celou konstrukci transformátoru. Možná jsou i jiná řešení.

2.20.5. Usměrňovačové transformátory

Jsou určeny pro spojení s křemíkovými polovodičovými usměrňovači. Jejich sekundární vinutí je zpravidla mnohofázové. Pro trakční účely bývá sekundární vinutí šestifázové, pro speciální účely v elektrolýze i dvanáctifázové.

Základní podmínkou pro konstrukci je zkratová odolnost. Pro zajištění této odolnosti musí být vinutí vhodně navrženo a dílensky velmi pečlivě zhotoveno. Musí být zejména *magneticky souměrné*. V opačném případě mohou posuvné síly vznikající při zkratu vinutí roztrhat. Celé vinutí



Obr. 49. Pohled na sekundární stranu transformátoru pro napájení křemíkového usměrňovače, typ aTUSb 721/6, 200 kVA, 1950/1125/26/15 V, šestifázové zapojení s nulovou tlumivkou (BEZ Bratislava, n. p.)

se musí důkladně vysušit, během sušení stahovat a důkladně impregnovat izolačním lakem, který vodiče, rozpěrky a vložky slepí v jeden pevný celek. Na stroji se vinutí axiálně stahuje šrouby pomocí ocelových stahovacích kruhů (rozřezaných). Spojky mezi vinutími a vývody k průchodkám musí být pevně sevřeny několika lištami.

Nejčastější bývá šestifázové zapojení s nulovou tlumivkou (obr. 33). Obě cívky jedné fáze jsou navinuty v samostatných vrstvách, které jsou v polovině výšky jádra překříženy. Tím se dosáhne rovnoměrného proudového zatížení železa po celé výšce a rovnoměrného rozdělení proudu na obě hvězdy (překřížením se vyrovná vliv rozptylového magnetického toku na obě cívky).

Na obr. 49 je pohled na sekundární stranu transformátoru na nízké napětí s nulovou tlumivkou pro křemíkový usměrňovač. Sekundární závity jsou z válcovaných hliníkových pásů. Cívka vznikne svařením sousedních závitů. Primární vinutí je přepínatelné se čtyřmi odbočkami.

2.21. PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY

2.21.1. Definice

Přístrojové transformátory se používají k přizpůsobení měřených veličin vhodnému rozsahu měřicích přístrojů a k oddělení měřicích a jisticích přístrojů od obvodu vysokého napětí.

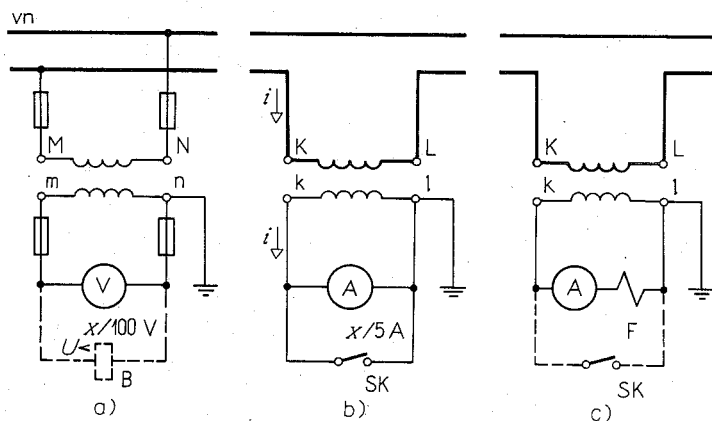
Podle měřené veličiny rozlišujeme:

a) transformátory napětí — používají se pro měření napětí v obvodech vn a vvn, mohou k nim být připojeny i jiné pomocné přístroje, např. podpětové relé nebo napětíová cívka elektroměru (obr. 50a),

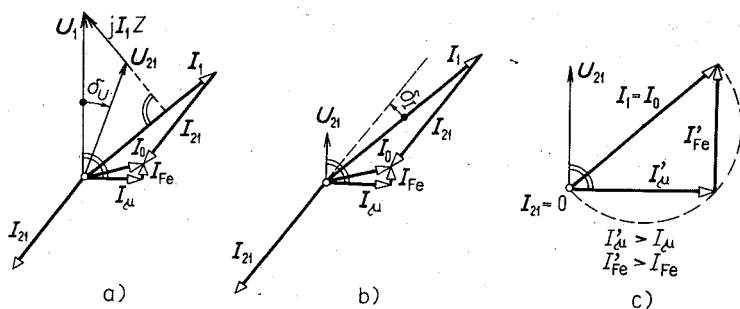
b) transformátory proudu — používají se buď pro měření velkých proudů v síti nn, nebo i menších proudů v obvodech vn, kde současně zastupují funkci izolačního (oddělovacího) transformátoru (obr. 50b), do série s transformátorem může být zapojena proudová cívka nadproudového ochranného relé (obr. 50c).

2.21.2. Chyby a vlastnosti

Fázorový diagram přístrojového transformátoru napětí je na obr. 51a. Jako u každého transformátoru i zde vzniká působením vnitřních úbytků napětí (IZ) rozdíl mezi napětími U_1 a U_{21} , tzn: že napětí na sekundární



Obr. 50. Základní zapojení přístrojových transformátorů
 a) transformátor napětí, b) transformátor proudu s ampérmetrem, c) transformátor proudu s ampérmetrem a ochranným nadproudovým relé, B – podpětové relé, F – cívka nadproudového relé, SK – spojovač nakrátko



Obr. 51. Fázorové diagramy přístrojových transformátorů
 a) napětí, b) proudu, za normálního provozu se zatíženým sekundárním obvodem (proud I_1 je dán zátěží), c) proudu, s rozpojeným sekundárním vinutím

straně nesleduje přesně změnu primárního napětí, a to způsobuje určitou chybu v měření.

Chyba napětí je definována poměrem

$$\varepsilon_U = \frac{U_{21} - U_1}{U_1} 100 = \frac{p_U U_2 - U_1}{U_1} 100 \quad [\%] \quad (97)$$

kde p_U je převod napětí.

Současně vzniká i rozdíl fázového posunu δ_U , který představuje tzv. úhlovou chybu. Udává se v minutách a představuje úhel mezi fázory U_1 a U_{21} . Chyba úhlu ovlivňuje přesnost měření výkonu a spotřeby.

Aby byly obě chyby co nejmenší, má mít transformátor napětí co nejmenší reaktanci a co nejmenší magnetizační proud (tzn. jakostní magnetický obvod, malá magnetická indukce).

Transformátor napětí představuje tvrdý zdroj napětí, a proto jeho svorky nesmí být nikdy spojeny nakrátko. Nesnáší zkratky a jeho primární a výstupní napětí musí být chráněno pojistkami.

Fázorový diagram proudů přístrojového transformátoru proudu se zatíženým výstupním vinutím je na obr. 51b.

I zde dochází k chybě proudu

$$\varepsilon_I = \frac{I_{21} - I_1}{I_1} 100 = \frac{p_I I_1 - I_1}{I_1} 100 \quad [\%] \quad (98)$$

kde p_I je převod proudů.

Úhel mezi fázory I_1 a I_{21} představuje úhlovou chybu δ_I , která se udává v minutách.

Chyba proudu ovlivňuje přesnost měření proudu, úhlová chyba ovlivňuje přesnost měření výkonu a spotřeby.

Velikost obou chyb závisí na magnetizačním proudu, proto musí být magnetický obvod z jakostního magnetického materiálu.

Transformátor proudu je za normálního provozu zkratován cívkou ampérmetru nebo proudovou cívkou nadproudového relé. Proto je jeho vnitřní reaktance velká, což se velmi nepříznivě projeví při rozpojení sekundárního obvodu.

Funkčně se fázorový diagram přístrojového transformátoru liší od fázorového diagramu normálního transformátoru, u kterého je primární proud dán velikostí požadovaného zatěžovacího proudu (I_{21}) a proudem naprázdno I_0 . Se změnou zatěžovacího proudu se mění i primární proud, za chodu naprázdno ($I_{21} = 0$) je malý a rovná se proudu I_0 .

U transformátoru proudu je primární proud dán – primárnímu vinutí je vnucen. Rozkládá se na složku I_{21} potřebnou ke krytí sekundárního odběru (přepočítaný proud procházející ampérmetrem) a na složku I_0 danou především magnetizačním proudem I_μ . Po rozpojení sekundárního obvodu ($I_{21} = 0$) se celý a nezměněný (měřený) proud I_1 rozloží na magnetizační složku I'_μ a na složku I'_{Fe} , která kryje ztráty v železe (obr. 51c).

Magnetizační proud je nyní podstatně větší než při zatížení, z magnetizační charakteristiky mu odpovídá větší magnetická indukce v jádře, a tedy i větší magnetický tok $\Phi' = B'S$.

Zvětšeným magnetickým tokem se indukuje v rozpojeném sekundárním vinutí zvýšené napětí

$$U'_{12} = 4,44\Phi'fN_2 \quad (99)$$

Toto napětí může být tak vysoké, že poškodí izolaci sekundárního vinutí a může být i příčinou smrtelného úrazu.

Zvětšené magnetické indukci odpovídají zvětšené ztráty v železe. Jímí se jádro přehřívá a při kvalitním materiálu může být úplně znehodnoceno, což se projeví zvětšením chyby měření. Proto se nesmí za provozu (pokud prochází primárním vinutím proud) sekundární obvod transformátoru proudu rozpojit. V jeho obvodu nesmějí být pojistky. Před odpojením měřicího přístroje (při změně jeho rozsahu nebo výměně) se musí sekundární obvod zkratovat.

Velikost budicího proudu je při každém vnuceném primárním proudu jiná. Pokud je jádro málo nasyceno, pracuje transformátor v přímkové části magnetizační charakteristiky a změny jsou téměř lineární. U větších proudů (tedy při větších magnetických indukcích v jádře), jsou změny vlivem ohybu magnetizační charakteristiky nelineární, což se projeví zvětšením chyby proudu.

Mírou kvality transformátoru proudu je jeho *nadproudové číslo* n , která udává násobek jmenovitého primárního proudu, při kterém dosáhne chyba proudu 10 %.

Dalším údajem určujícím vlastnost transformátoru proudu je jeho *jmenovitý proud*. Je to efektivní hodnota primárního proudu, který transformátor vydrží bez tepelného poškození po dobu jedné sekundy. Podle něho se musí dimenzovat měřicí transformátor proudu s ohledem na velikost zkratových proudů, které se v uvažovaném místě sítě mohou vyskytovat.

Na štítku přístrojových transformátorů napětí a proudu se navíc uvádí třída přesnosti a jmenovitá zátěž.

Třída přesnosti vyjadřuje celkový vliv chyb na přesnost měření, udává se v procentech jmenovité hodnoty a může být: 0,2; 0,5; 1,0 a 3,0 %.

Jmenovitá zátěž udává zdánlivý výkon, kterým můžeme na sekundární straně transformátor zatížit bez překročení dovolené chyby.

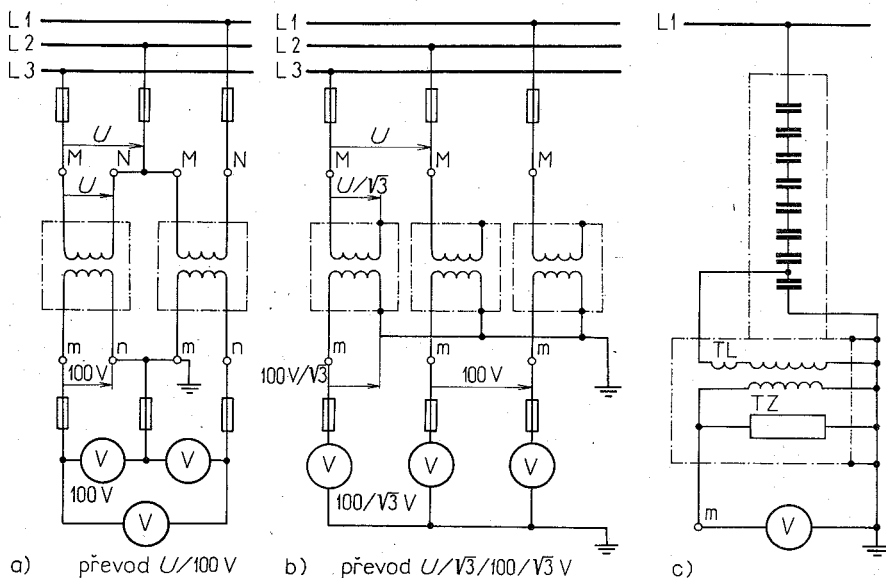
2.21.3. Konstrukce přístrojových transformátorů napětí

Podle izolace vinutí mohou být transformátory napětí

a) dvoupólově izolované (obr. 52a),

b) jedнопólově izolované (obr. 52b).

Zvláštní skupinu tvoří tzv. kapacitní transformátory napětí, používané pro velmi vysoká napětí (obr. 52c). Vlastní indukční transformátor je z důvodů izolace připojen jen na odbočku kapacitního řetězce zapojeného mezi fází a zem.



a) převod $U/100\text{ V}$

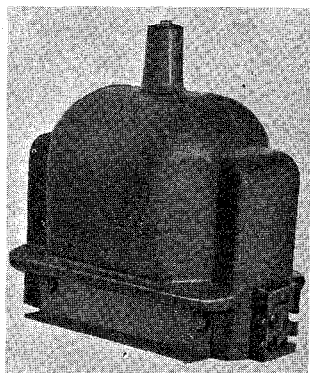
b) převod $U/\sqrt{3}/100/\sqrt{3}\text{ V}$

c)

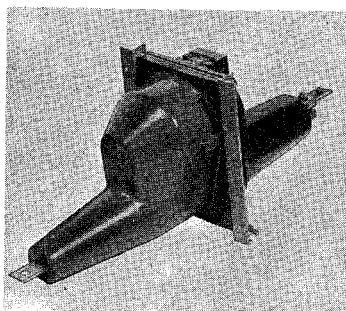
Obr. 52. Přístrojové transformátory napětí;

a) dvoupólově izolovaný, b) jedнопólově izolovaný, c) kapacitní, TL – doladovací tlumivka, TZ – tlumící prvek

Konstrukčně se od sebe liší transformátory vn a vvn. Dnes se do 35 kV téměř výhradně používají transformátory zalité v epoxidových pryskyřicích (obr. 53a), zhotovené pro vnitřní montáž. Transformátory vvn jsou v porcelánových izolátorech typického tvaru, ve venkovním provedení. Jsou výhradně jedнопólově izolované.



a)



b)

Obr. 53. Přístrojové transformátory vn zalité v epoxidové pryskyřici,
EJF Brno, n. p.

a) napětí, typ J, b) proudu, typ S

Výstupní napětí napěťových transformátorů je u nás 100 V, v zahraničí i 110 V. U trojfázové soustavy je možné jedním elektromagnetickým voltmetrem pomocí voltmetrického přepínače měřit všechna sdružená i fázová napětí.

Napětí 100 V je vždy sdružené napětí v trojfázové soustavě. Podle toho skutečné výstupní fázové napětí transformátoru napětí závisí na jeho zapojení.

U dvojpólově izolovaného transformátoru (obr. 52a) je $U/100$ V, kde U je primární sdružené napětí, např. 22 000/100 V. U jednopólově izolovaného transformátoru (obr. 52b) je $U/\sqrt{3}/100/\sqrt{3}$ V.

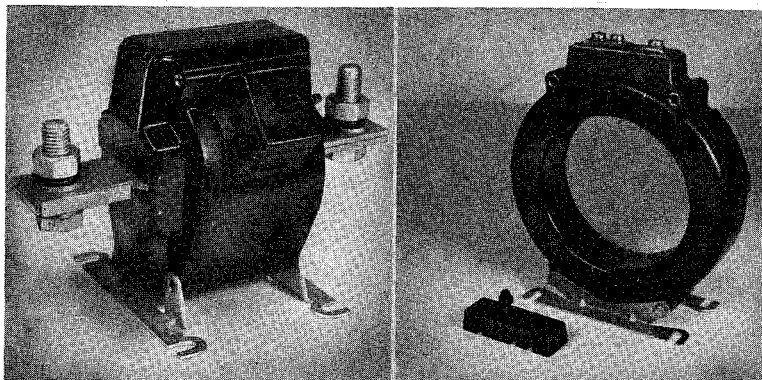
2.21.4. Konstrukce přístrojových transformátorů proudu

Podle izolačního napětí rozlišujeme

a) transformátory proudu nm , upravené obvykle v pouzdru z lisovací tvrditelné látky (obr. 54),

b) transformátory proudu vn , pro vnitřní rozvodny, dnes téměř výhradně zalité v epoxidové pryskyřici (obr. 53b),

c) transformátory proudu vvn , pro vnější rozvodny, uložené v porcelánových izolátorech.



a)

b)

Obr. 54. Transformátory proudu nn
a) závitový, b) prstencový, návlačný

Podle počtu výstupních vinutí jsou transformátory proudu
a) *s jedním jádrem* — s jedním výstupním vinutím (převod např. 150/5 A),

b) *s několika jádry* — mají několik samostatných magnetických obvodů s vlastním výstupním vinutím, ale společným vinutím primárním, zpravidla bývají dvoujádrové (převod např. 150/5/5 A nebo 150/5/1 A); několik výstupních vinutí je třeba tehdy, jestliže se mají od sebe izolovat např. měřicí a jisticí obvody, jestliže se požadují odlišné měřicí a jisticí charakteristiky (různé třídy přesnosti, různá nadproudová čísla) nebo různé sekundární proudy.

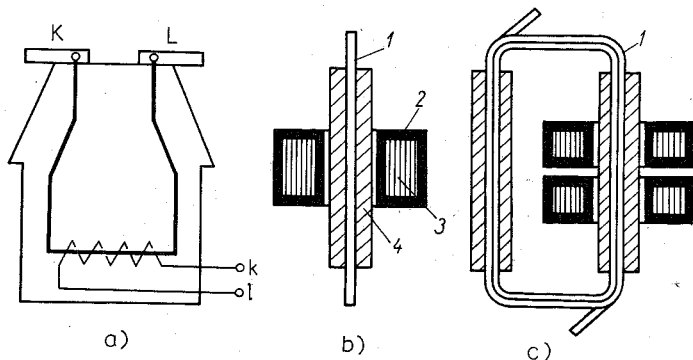
Podle uspořádání primárního vinutí jsou transformátory proudu
a) *s jedním závitem*, u nichž vodič primárního vinutí prochází magnetickým obvodem jen jednou,

b) *s několika závity*, u nichž je primární vinutí tvořeno více závity.

Podle celkového uspořádání mohou být transformátory proudu
a) *podpěrné*, tvoří současně podpěrný izolátor pro ploché přípojnice vn (obr. 55a),

b) *průchodkové*, tvoří současně izolační průchodku v rozvodně vn (obr. 53b),

c) *násuvné*, bez zvláštního primárního vinutí; to je nahrazeno přípojnicovým pásem, na který se transformátor (jádro se sekundárním vinutím) nasune (obr. 54c),



Obr. 55. Zvláštní tvary transformátorů proudu
 a) podpěrný, b) tyčový, jednojádrový (1 – primární vodič, 2 – sekundární vodič, 3 – jádro, 4 – průchodka), c) smyčkový, dvoujádrový (1 – primární vinutí)

d) *tyčové*, jednozávitové transformátory, jejichž primární vodič je tvořen tyčí (pásem); od jádra a sekundárního vinutí je tato tyč izolována průchodkou (obr. 55b),

e) *smyčkové*, s primárním vinutím tvořeným několika závitů ve tvaru smyčky, které prochází dvěma izolačními průchodkami (obr. 55c); upraven bývá jako průchodkový, dnes je nahrazen jednodušším a jakostnějším průchodkovým transformátorem v epoxidové pryskyřici.

Jmenovitý sekundární proud je zpravidla 5 A, jen v ojedinělých případech 1 A.

2.22. TLUMIVKY

2.22.1. Všeobecné údaje

Tlumivky jsou přístroje podobné transformátorům, ale mají pouze jedno vinutí. Používají se pro zvětšení indukčnosti elektrických obvodů.

Charakteristické veličiny tlumivek

a) *izolační napětí* U – udává napětí sítě, ve které lze tlumivku použít vzhledem k izolačním poměrům,

b) *reaktanční napětí* U_X – představuje úbytek napětí vyvolaný průchodem jmenovitého proudu. V úvahu přichází jen reaktanční úbytek

napětí, neboť činný odpor tlumivky je zanedbatelný, takže platí

$$U_X = IX \quad [V; A, \Omega] \quad (100)$$

c) procentní reaktance U_X – vyjadřuje reaktanční napětí v procentech izolačního napětí

$$u_X = \frac{IX}{U} 100 \quad [%; A, \Omega, V] \quad (101)$$

d) vnitřní (typový) výkon P_i – (nazývá se také jmenovitý výkon) je dán součinem

$$P_i = mU_X I \cdot 10^{-3} \quad [kVA; V, A] \quad (102)$$

kde m je počet fází,

e) průběžný výkon P

$$P = mUI \cdot 10^{-3} \quad [kVA; V, A] \quad (103)$$

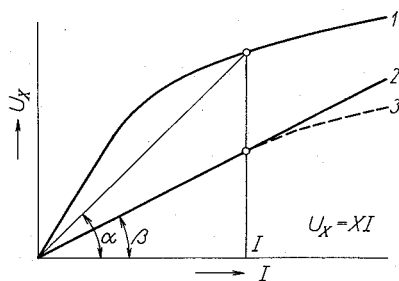
f) charakteristika tlumivky – udává závislost reaktančního úbytku napětí na proudu; kdyby magnetický obvod byl složen jen ze železa, odpovídal by její průběh magnetizační křivce podle obr. 56,

g) reaktance tlumivky X – je podle obr. 56 dána vztahem

$$X = \frac{U_X}{I} = \operatorname{tg} \alpha \quad (104)$$

S rostoucím proudem se úhel α zmenšuje, z čehož vyplývá, že reaktance tlumivky se železným jádrem klesá.

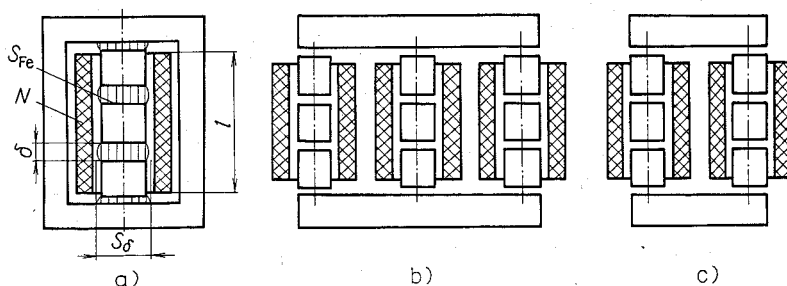
Vyžadujeme-li konstantní reaktanci, musí být charakteristika přímková, u níž je $\operatorname{tg} \beta$ konstantní. Přímkové charakteristiky můžeme dosáhnout malou magnetickou indukcí a tím, že železné jádro přerušíme několika



Obr. 56. Charakteristika tlumivky
 1 – tlumivka bez vzduchové mezery,
 2 – tlumivka se vzduchovou mezerou,
 3 – vliv přesycení železného jádra

menšími vzduchovými mezerami. Reaktance je potom dána především jejich geometrickými rozměry. Jen u větších proudů se projeví vliv přesycení železa, což vyvolá mírné klesání charakteristiky.

Schematická úprava magnetického obvodu je naznačena na obr. 57.



Obr. 57. Magnetický obvod tlumivky
 a) jednofázový, plášťový, b) trojfázový, jádrový, c) jednofázový, jádrový

2.22.2. Určení reaktance tlumivky

Reaktance tlumivky se vzduchovými mezerami

$$X = 8fN^2 \frac{S}{\Sigma \delta} \cdot 10^{-6} \quad (105)$$

Při přesnějším výpočtu se respektuje zvětšení průřezu vzduchové mezery vydutím indukčních čar (obr. 57a) a zvětšení reaktance magnetickým tokem, který se uzavírá vinutím a mezerou mezi ním a železným jádrem.

Pokud jsou vzduchové mezery malé (10 až 15 mm), můžeme zvětšený průřez vzduchové mezery určit přibližně z průřezu železného jádra

$$S_{\delta} = S_{Fe} + 0,015 \sqrt{S_{Fe}} \quad [m^2] \quad (106)$$

a vliv magnetického toku jdoucího mimo vzduchovou mezeru zahrnout 10% a 20% přídatkem, takže dostaneme

$$X = (1,1 \text{ až } 1,2) 8fN^2 \frac{S_{\delta}}{\Sigma \delta} \cdot 10^{-6} \quad [\Omega; \text{Hz}, m^2, m] \quad (107)$$

2.22.3. Rozdělení a použití tlumivek

Podle způsobu zapojení v elektrickém obvodu rozdělujeme tlumivky na

- a) sériové, označení svorek A1 – B1 – C1, A2 – B2 – C2,
- b) paralelní, označení svorek N – A – B – C.

Podle magnetického obvodu rozlišujeme tlumivky

- a) s feromagnetickým obvodem,
- b) bez feromagnetického obvodu – reaktory.

Tlumivky s feromagnetickým obvodem (se železným jádrem) se v různých technických úpravách používají k velmi rozmanitým účelům.

1. Předřadné sériové tlumivky se používají místo předřadných odporů ke snížení napětí na spotřebiči při použití střídavého proudu. Jsou výhodnější, neboť jejich činné ztráty jsou nepatrné, takže jejich použití je hospodárné.

V síti nn můžeme předřadné tlumivky použít ke snížení síťového napětí na provozní napětí výbojkových a obloukových svítidel.

2. Spouštěcí tlumivky jsou sériové tlumivky určené ke snížení záběrného proudu při spouštění elektromotorů na střídavý proud. Používají se jen ojedinelé.

3. Nulové tlumivky jsou paralelní tlumivky sloužící k vytvoření umělého nulového bodu v síti s nevyvedeným uzlem.

4. Pecové tlumivky se zapojují do série s primárním vinutím pecových transformátorů k omezení proudových nárazů při zkratech.

5. Vyrovnávací sériové tlumivky slouží k dosažení potřebných proudových poměrů v paralelních částech elektrického obvodu. Předřazují se např. transformátorům s menším napětím nakrátko při paralelním chodu.

6. Vyhlazo vac í tlumivky se používají k vyhlazení průběhu proudů s vyššími harmonickými, např. v elektrické trakci pro vyhlazení usměrněného proudu. Zvláště aktuální jsou pro pohony elektromotorů s tyristorovým řízením. Odstraňují následky zvlnění jejich napájecího napětí a zmenší se jimi typový výkon a hlučnost motoru.

7. Kompenzační tlumivky se připojují paralelně k vedení vvn, zvláště při napětích 500 kV, 750 kV a vyšších. Slouží ke kompenzaci kapacitních nabíjecích proudů a tím přispívají ke stabilitě přenosu a omezení provozních přepětí.

8. Zhášecí tlumivky (Petersenovy rezonanční cívky) se zapojují mezi izolovaný uzel vinutí vn transformátoru a zem. Snižují poruchovost rozsáhlých sítí působením zemních spojení, která představují asi 80 % všech poruch.

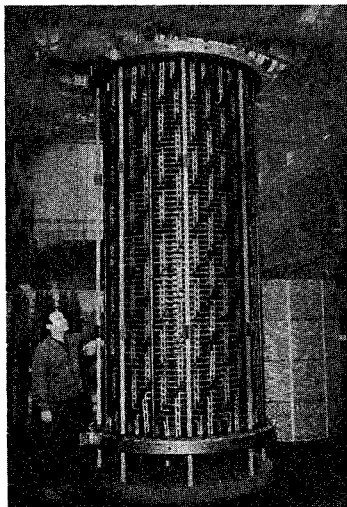
2.22.4. Reaktory

Jsou to tlumivky, jimiž se omezují zkratové proudy v sítích nebo ve velkých strojích. Požaduje se přímková charakteristika i při značných proudech, a proto jsou vždy bez železa. Zkratovou odolnost zaručuje pevné mechanické vyztužení vinutí nemagnetickou stahovací konstrukcí nebo zalití do betonu.

Na štítku reaktoru se kromě běžných údajů (I , u_x , f , U) udává násobek jmenovitého proudu, který musí reaktor bezpečně vydržet, a přípustná doba trvání zkratu. Oteplení při zkratu dosahuje až 200 K.

Používá se buď jeden reaktor trojfázový, nebo tři reaktory jednofázové. Provedení je vzduchové nebo olejové. Vzduchové provedení se používá do napětí 35 kV, olejové pro napětí vyšší než 35 kV nebo pro venkovní montáž.

Olejové reaktory mají kolem cívek upraven plášť složený z kvalitních plechů, kterým se uzavírá zpětný magnetický tok, takže se neuzavírá



Obr. 58. Jednofázový diferenciální reaktor, Škoda n. p., Plzeň, $2 \times 728/7280$ kVAr, 2×2000 A, $2 \times 10\%$ z $63\,000/\sqrt{3}$

nádobou. Při zkratu se rychle reaktor přesytí, a tak téměř celý magnetický tok musí procházet jen vzduchem. Tím se vyloučí vliv železa na reaktanci reaktoru.

Vinutí se zhotovuje z měděných nebo hliníkových pásů, někdy i z lan. U vzduchových reaktorů bývá izolace azbestová, u olejových papírová. Sítě, ve kterých je zapojen reaktor, jsou měkké, jejich napětí se zatížením rychleji klesá a pracují s horším účínkem.

Reaktory je třeba dnes používat v městských rozvodných sítích, napájených několika tvrdými zdroji, aby nebyl překročen předepsaný zkratový výkon sítě (např. 400 MVA pro 22 kV), na který jsou přístroje dimenzovány.

Příklad vzduchového jednofázového reaktoru je na obr. 58.

2.22.5. Přesytky

Přesytka je tlumivka, která je upravena tak, že pracuje s jádrem magneticky nasyceným. Má dvě vinutí – *pracovní* a *řídící*. Řídícím vinutím prochází stejnosměrný proud, kterým se jádro magneticky přesycuje. Pracovním vinutím prochází střídavý proud, jehož velikost se mění podle reaktance přesytky. Reaktance přesytky se totiž v oblasti přesycení jádra velmi značně mění už při malé změně řídícího proudu. Tak je možné malým příkonem řídícího stejnosměrného proudu řídit velké proudy v pracovním vinutí.

Transduktor se skládá z jedné nebo několika přesytek speciálně upravených k různým konkrétním řídicím účelům.

Přesytky a transduktory se používají už ojedinele, např. k měření velkých stejnosměrných proudů.

2.23. KONSTRUKCE TRANSFORMÁTORŮ

2.23.1. Rozdělení transformátorů podle způsobu chlazení

Provedení transformátorů je kromě výkonu podmíněno především chlazením. Podle ČSN 35 1000 musí mít všechny elektromagnetické netočivé stroje na štítku uveden druh chlazení písmenovou značkou tohoto složení

1. druh chladiva, které se stýká s vinutím,
2. způsob jeho oběhu,
3. druh chladiva, které se stýká s vnější chladicí soustavou,
4. způsob jeho oběhu.

Znaky druhu chlazení

- O olej,
- L nehořlavá izolační tekutina (askarel apod.),
- G plyn,
- W voda,
- S tuhý izolant,
- A vzduch.

Znaky pro způsob oběhu

- N přirozený,
- F nucený neřízený,
- D nucený řízený.

Příklad označení

OFAF – transformátor s nuceným oběhem a ofukováním,

AF – vzduchový transformátor s ofukováním,

ONAN/ONAF – transformátor s přirozeným oběhem oleje a s ofukováním od určitého výkonu.

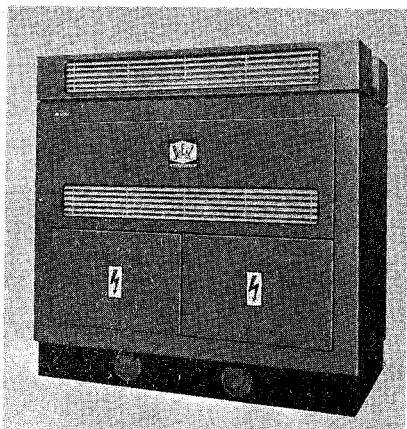
Používané způsoby chlazení jsou popsány v dalších článcích.

2.23.2. Vzduchové transformátory – A

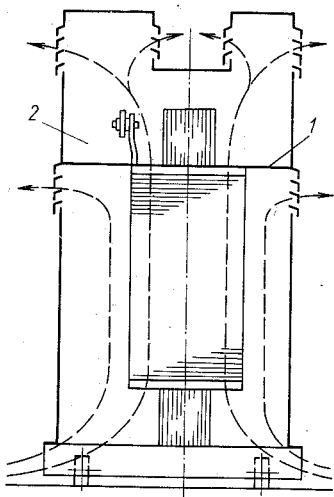
Jsou chlazeny vzduchem, který se na povrchu aktivních částí ohřívá, vlastním vzlakem stoupá, a tak způsobuje přirozené proudění (AN). Původní vzduchové transformátory byly nechráněné (IP00) a pro snadnější dopravu byly opatřeny transportními kruhy. Jejich vývoj trval do roku 1950.

Příklad moderního řešení vzduchového transformátoru je na obr. 59. Transformátor (výrobek BEZ Bratislava, n. p.) je uložen v plechové skříni, která představuje ochranu před nebezpečným dotykem (IP 23). Aby tato skříň nezmenšovala jmenovitý výkon, musí být vhodně navržena. Pak může dokonce proudění vzduchu podporovat. Skříň zvětšuje prou-

dění vzduchu střešním nástavcem, který zvětšuje komínový tah, a vodorovnou vnitřní bariérou nad vinutím (obr. 60). Bariéra rozděljuje nasávaný vzduch na dva proudy. Jeden ochlazuje povrch vinutí a vystupuje bočními žaluziovými otvory vlastní skříně, druhý prochází kanály mezi vinutím, vstupuje přímo do střešního nástavce a vychází jeho bočními otvory ven. Tím se zmenší hydraulický odpor proudění a vyloučí se zbytečné ohýbání a míchání vzduchových proudů.



Obr. 59. Vzduchový transformátor
v plechové skříní, typ aTS, 630 až 1600 kVA,
6000/400 V, Dy 1, IP 23, BEZ Bratislava, n. p.



Obr. 60. Skříň vzduchového transformátoru
s vodorovnou bariérou nad vinutím
1 – bariéra, 2 – střešní nástavec

Takovým uspořádáním dosáhneme toho, že skříň vůbec nezmenšuje výkon transformátoru, zatím co transformátory s jednoduchou skříňí mají jmenovitý výkon o stupeň nižší než transformátory bez skříňí.

Chlazení vzduchových transformátorů ve skříňí můžeme zlepšit i nuceným prouděním pomocí přídavného ventilátoru (chlazení AF).

Všechny moderní vzduchové transformátory mají důmyslně upravené hliníkové vinutí (čl. 2.24.2c) a magnetický obvod z orientovaných plechů, které zmenšují ztráty v železe a zlepšují tepelné podmínky.

Uplatňují se čím dál víc, především jako distribuční transformátory v občanské výstavbě, kde se uplatní jejich menší náročnost na stavenišťě (menší půdorys, nepřítomnost oleje a tím vyloučení nebezpečí požáru). Přímo jsou předepsány tam, kde s ohledem na charakter prostředí je třeba hořlavý a v krajním případě i výbušný olej vyloučit. Vyšší cena je vyvážena tím, že transformátory nepotřebují samostatnou transformátorovou komoru s náležitým protipožárním zabezpečením.

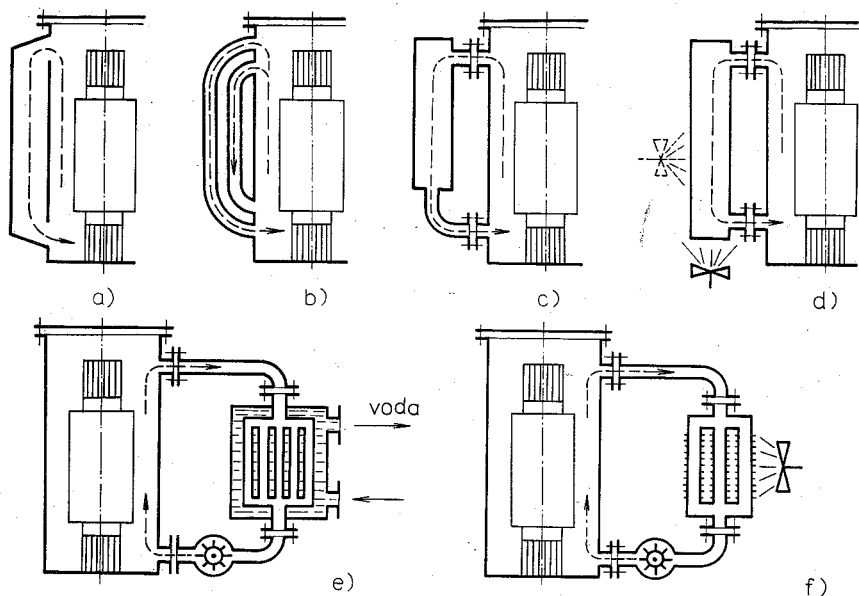
2.23.3. Olejové transformátory s přirozeným prouděním a přirozeným odvodem tepla z povrchu nádoby – ONAN

Transformátory středních výkonů mají aktivní části ponořeny v nádobě naplněné transformátorovým olejem, který velmi dobře odvádí teplo a současně zmenšuje vnitřní izolační vzdálenosti. Olej přirozeným vztlakem cirkuluje a odvádí teplo na povrch nádoby. Přirozené proudění oleje stačí do výkonů až 50 MVA. Povrch nádoby je podle potřeby (výkonu) různým způsobem zvětšen:

1. Hladká nádoba stačí odvést ztráty do výkonu transformátoru 30 až 50 kVA. Stěny nádoby mohou mít vylisováno několik nízkých žebírek pro zvětšení mechanické pevnosti.

2. Vlnitá nádoba má na všech nebo jen na protilehlých stěnách úzká a poměrně vysoká žebra vytvořená ohnutím obvodového plechu. Olej se na povrchu aktivních částí ohřívá, stoupá vlastním vztlakem nahoru, podél stěn se ochlazuje a klesá zpět ke dnu nádoby. Toto přirozené proudění můžeme zvětšit stěnami upravenými na vnitřní straně vln (obr. 61a).

Vlnitou nádobou můžeme transformátor ochlazovat až do výkonu 2500 kVA.



Obr. 61. Schéma chlazení olejových transformátorů

- a) přirozené chlazení v nádobě s vlnami – ONAN, b) přirozené chlazení v nádobě s trubkami, c) přirozené chlazení v nádobě s radiátory, d) přirozené chlazení s radiátory ofukovanými vzduchem – ONAF, e) nucené chlazení s vodním chladičem – OFWF, f) nucené chlazení se vzduchovým chladičem – OFAF

Spodní hrana vln nesahá až ke dnu nádoby, končí přibližně v těch místech, kde začíná vinutí. Spodní prostor vln je už málo účinný a zbytečně zvětšuje celkové množství oleje. Původní tvar vln se stejnou šířkou olejového i vzduchového kanálu byl nahrazen úzkými vlnami, které při zmenšeném obsahu oleje zvětšují chladicí účinek vzduchu.

U nás se vlnové nádoby pro svou technologickou pracnost přestaly vyrábět.

3. Trubkovou nádobu lze použít až do výkonu 16 až 20 MVA. Chladicí trubky jsou olejotěsně zavařeny do stěn nádoby (obr. 61b), takže nádoba je značně pevnější než nádoba vlnitá. Trubková nádoba vyhovuje tam, kde je vystavena větším otřesům.

Jestliže povrch jednoduché trubkové nádoby nestačí, zvětšuje se soustavou trubkových harf.

Nádoby s jednoduchou soustavou trubek se už nevyrábějí. V n. p.

BEZ Bratislava se do výkonu 400 kVA vyrábějí nádoby s plochými oválnými trubkami, které pro svou jednoduchost a vysokou produktivitu nahrazují vlnové i trubkové nádoby. Ploché oválné trubky jsou oproti kruhovým trubkám výhodnější tím, že na jednotku chladicí plochy dosahují až 50% objemové úspory oleje.

Příklad provedení takové nádoby je na obr. 76.

4. Radiátory jsou jednoduché výměníky tepla, skládající se z plochých chladicích těles (obvykle z tenkého lisovaného plechu) zaústěných do společných komor, které jsou přírubami připojeny k nádobě (obr. 62c). Radiátory velmi účinně zvětšují chladicí plochu při poměrně malém objemu. Aby bylo chlazení co nejučinnější, má být těžiště radiátorů nad těžištěm vinutí, které je hlavním zdrojem tepla. Proto ani radiátory nesahají až ke dnu nádoby, ale jsou kratší, i za cenu zvětšeného radiálního rozměru celého transformátoru.

Naproti tomu je ale výhodné, jestliže spodní sběrné potrubí radiátorů je trubkami zaústěno až na dno nádoby (obr. 61c). Tím se chlazení účastní větší množství oleje a zlepši se chladicí účinek a přetížitelnost.

2.23.4. Olejové transformátory s přirozeným prouděním a ofukováním — ONAF

Pro větší výkony (u nás asi od 12,5 MVA), se chlazení zlepšuje ofukováním radiátorů vzduchem (obr. 61d). Toto chlazení je vhodné pro transformátory s výkonem do 80 až 150 MVA.

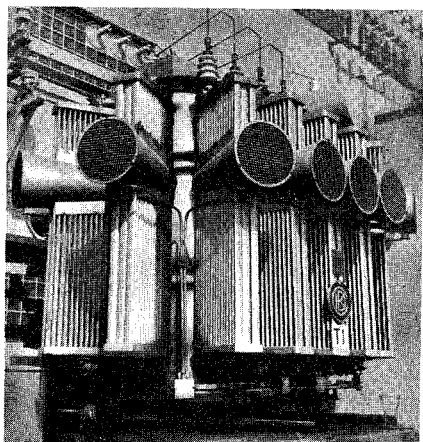
Původně se používal jeden společný ventilátor pro všechny radiátory, dnes má každý radiátor svůj vlastní ventilátor, což je sice nákladnější, ale provozně spolehlivější.

Ofukování je buď příčné, s jedním (obr. 62a) či s několika ventilátory (obr. 62b), nebo podélné s ventilátory pod radiátory (obr. 62c).

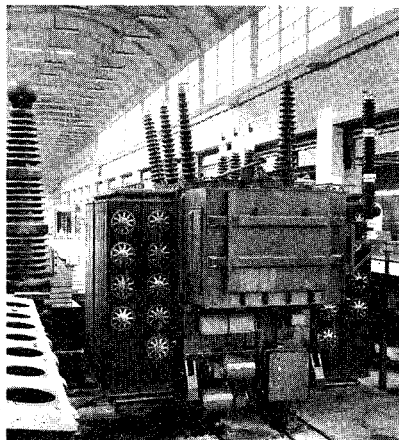
Radiátorové bloky lze zpravidla při dopravě demontovat, což zmenšuje rozměry i hmotnost.

Podle ČSN 35 1120 musí být transformátory s ofukováním dimenzovány tak, že bez ventilátorů (jen s přirozeným vzduchovým chlazením) vydrží trvale 70 % jmenovitého zatížení. Po dobu jedné hodiny musí vydržet plný výkon bez toho, že by oteplení překročilo 75 K.

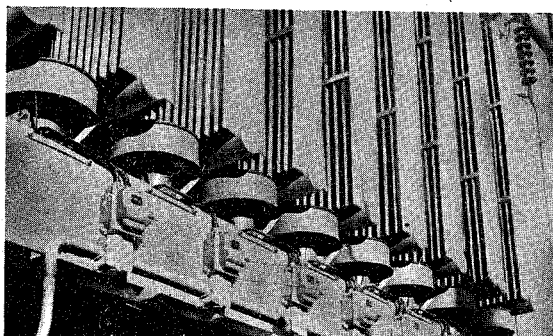
Ventilátory mohou být vypínány automaticky podle kolísání zatížení (ONAN/ONAF). Tím se ušetří energie potřebná k jejich pohonu.



a)



b)



c)

Obr. 62. Radiátory s příčným ofukováním

a) starší konstrukce s jedním ventilátorem, b) radiátory z plochých trubek s několika ventilátory, c) umístění ventilátorů pod radiátory

Pro životnost transformátoru je však výhodnější, jestliže se ventilátory nechají v provozu i při poklesu zatížení. Tím klesá teplota vinutí a životnost izolace se prodlužuje. Při nižší teplotě vinutí jsou kromě toho ztráty ve vinutí menší.

2.23.5. Olejové transformátory s nuceným oběhem oleje přes vodní chladič — OFWF

Transformátor má hladkou nádobu. Chlazení obstarává vodní chladič, přes který je olej protlačován čerpadlem tak, že teplý olej se nasává pod víkem nádoby a ochlazený vstupuje do spodní části nádoby (obr. 61e).

Kdyby došlo k poškození olejové trubky ve vodním chladiči, mohla by voda zničit a znehodnotit olej v celé nádobě. Proto tlak cirkulujícího oleje musí být větší než tlak chladicí vody. Při poruše vytéká olej do vody a voda nemůže vniknout do nádoby transformátoru. Unikání oleje signalizuje Buchholzovo plynové relé, takže porucha se hned zjistí.

Tento způsob chlazení je výhodný zejména u transformátorů s velkým výkonem. Hladká nádoba má menší rozměry, takže ji lze pohodlněji přepravovat. Chladič se přepravuje samostatně.

Nevýhodou nucené cirkulace je, že při poruše čerpadla je nutné transformátor vyřadit z provozu, neboť jeho hladká nádoba zpravidla nestačí odvést ani ztráty naprázdno.

Chladič může být umístěn mimo transformátor (úspora půdorysu) nebo bývá umístěn i s čerpadlem na tělese nádoby.

Vodní chladič se skládá ze soustavy měděných nebo mosazných trubek, kterými protéká voda. Proudění oleje, který trubky omývá, je usměrňováno soustavou plechů. Chladicí vodní trubky musí mít povrch 0,2 až 0,3 m² na 1 kW ztrát.

2.23.6. Olejové transformátory s nuceným oběhem oleje přes ofukovaný chladič — OFAW

Vodní chladič bývá v poslední době stále více nahrazován vzduchovým chladičem, který není vázán na potřebu chladicí vody a na její případné chlazení v dalším přídavném zařízení. Vzduchový chladič se zavádí i místo ofukovaných radiátorů, neboť zmenšuje hmotnost a rozměry transformátoru. Nutný je v pojízdných zařízeních.

Chlazený olej protéká žebrovanými trubkami, které jsou ofukovány proudem vzduchu z výkonného ventilátoru (obr. 61f).

2.23.7. Olejové transformátory s řízeným nuceným oběhem — OD...

Pro transformátory velkých až mezních výkonů nestačí k odvedení ztrát z vnitřku vinutí a jádra přirozené ani nucené proudění oleje. Intenzivního vnitřního chlazení dosáhneme řízeným prouděním. Olej je veden soustavou kanálů a bariér tak, že nuceně omývá jednotlivé cívky vinutí v několika samostatných proudech a nuceně musí vstupovat i do kanálů magnetického obvodu.

2.23.8. Transformátory chlazené nehořlavými izolačními kapalinami – L...

Tam, kde je třeba vyloučit hořlavý a výbuchem nebezpečný olej a kde není možné použít vzduchový transformátor (jako např. v prašných a korozivních prostředích), se k chlazení transformátorů používají syntetické nehořlavé izolační kapaliny různých obchodních značek (Sovol, Pyranol, Clophén, Soptol apod.). Označují se společným názvem askarely.

Výhodou askarelů je to, že pro svou vlastní nehořlavost nešíří dále požár (jako minerální oleje), jsou nevýbušné a vykazují navíc hasící účinky. Při jejich použití nejsou potřebná protipožární opatření předepsaná pro stanoviště olejových transformátorů (ČSN 38 1753). V praxi se používají do výkonu 2000 kVA a do napětí 12 000 V. Askarelová náplň vydrží bez regenerace 25 až 30 let. Nemají však hasící účinek na elektrický oblouk, proto v nádobě nemůže být výkonový přepínač odboček pro řízení napětí při zatížení.

Nevýhodou používání askarelů je větší hmotnost transformátorů a to, že se za provozu působením případných oblouků uvnitř nádoby uvolňují z askarelů jedovaté plyny, převážně chlorovodík.

Samotná tekutina je jedovatá, a proto se už při výrobě musí dodržovat předepsaná bezpečnostní opatření.

Prostor s askarelovým transformátorem musí být dobře větrán, nejlépe komínem, který vyúsťuje nad střechou budovy.

U nás vyrábí nehořlavou náplň n. p. Chemko Strážské pod názvem Delor 105 T.

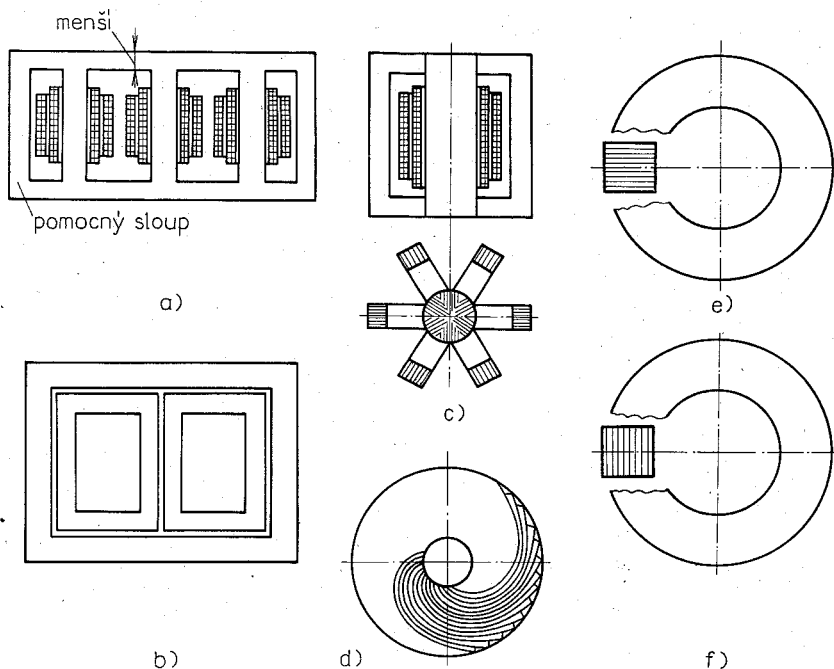
2.24. KONSTRUKČNÍ DETAILY

2.24.1. Magnetický obvod

Donedávna vyráběné transformátory měly magnetický obvod zhotovený z plechů Et 1,3/0,35, válcovaných za tepla. Dnes se magnetické obvody vyrábějí téměř výhradně z orientovaných plechů Eo, válcovaných za studena, s měrnými ztrátami $\Delta p_{1,5} = (1,11 \text{ až } 1,12) \text{ W kg}^{-1}$ a z oboustrannou keramickou izolací, zesílenou při větších magnetických indukcích ještě dodatečným lakováním. Řezné hrany se proti korozi chrání nanesením silikonového laku.

Magnetický obvod se skládá z *jader* a *spojek*. Jejich běžné uspořádání je na obr. 3. Zvláštní tvary jsou na obr. 63.

1. Trojfázový pětijádrový typ (obr. 63a) má vinutí umístěné na třech středních sloupech. Krajní sloupy odlehčují magneticky obě hlavní spojky, takže ty mohou mít menší průřez a tím i menší výšku. Takto konstruovaný transformátor se snadněji vejde do železničního profilu.



Obr. 63. Zvláštní tvary magnetických obvodů

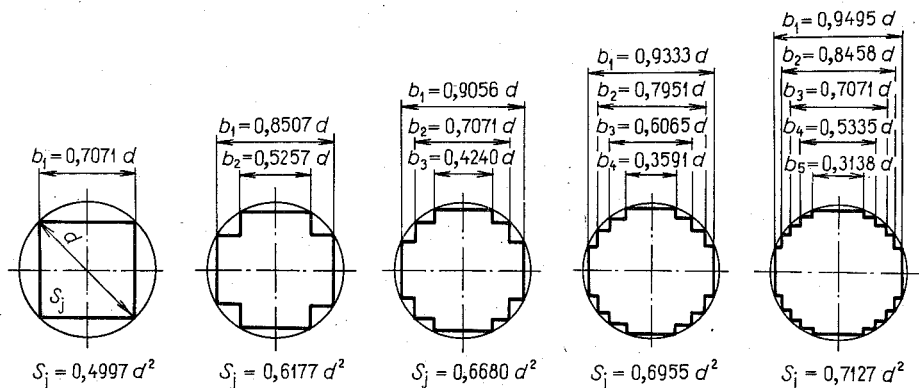
- a) trojfázový, pětijádrový, rovnoběžně skládaný, b) rámová konstrukce, c) jednofázový s radiálně skládaným jádrem, d) evolventně skládané jádro, e) prstencové skládané jádro, f) vinuté prstencové jádro

2. Rámová konstrukce (obr. 63b) se používá při velkých průřezích jádra, které vyžadují chladicí kanál. Tato konstrukce umožňuje snadnější skládání obvodu při velmi účinném chlazení. Problémem je nerovnoměrné rozdělení magnetických toků, která vyvolá asi 10% zvětšení ztrát na prázdno.

3. Jednofázový obvod s radiálně skládaným jádrem kruhového průřezu (obr. 62c) je uzavřen postranními spojkami tvaru U. Těch je na obvodu více, mohou mít menší průřez a tím i menší výšku.

4. Evolventně skládaná jádra (obr. 62d) mají výhodný kruhový průřez skládaný ze stejných pásů, nastříhaných z vhodně širokého svitku.

5. Prstencová jádra jsou buď skládaná z mezikruží (obr. 63e), nebo výhodněji navinutá z pásu (obr. 63f). Užívají se ve speciálních případech, zvláště při výrobě měřicích transformátorů. Průřez jádra je téměř výhradně několikanásobně odstupňován (obr. 64). Neekonomičtější kruhový průřez (nejmenší obvod při dané ploše – úspora vodičů) mohou mít jen radiálně a evolventně skládaná jádra. Výrobně nejjednodušší čtvercový průřez mívají jen malé transformátorky a velké trojfázové transformátory s plášťovým magnetickým obvodem. Průřez spojky bývá obdélníkový, při větších rozměrech jednou nebo několikrát odstupňovaný (lepší chlazení).



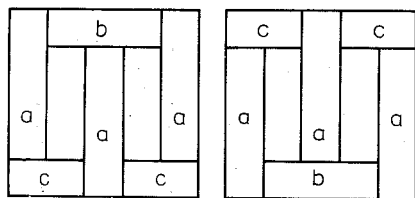
Obr. 64. Rozměry odstupňovaných průřezů jádra

Magnetický obvod se skládá ve dvou vrstvách podle obr. 65. U orientovaných plechů musí osa magnetického toku souhlasit se směrem válcování. V rozích musí být plechy zešikmeny pod úhlem 45° , aby magnetický tok co nejméně procházel kolmo ke směru válcování. Sešikmit by se měl i spoj středního jádra se spojkou. Pro technologickou náročnost se od této úpravy upouští.

Aby byl při stříhání plechů co nejmenší odpad, musí se vypracovat pečlivý *stříhací plán*, který respektuje výrobní rozměry tabulí nebo pásů.

Dnes se pro sestavení optimálního stříhacího plánu používají i počítače. Odpad potom tvoří nejvýše 2,5 až 3 %.

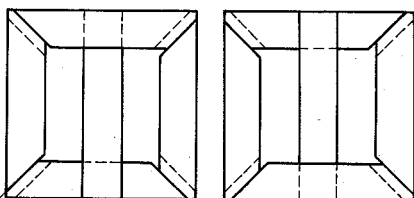
Mezi plechy se vkládají pásy lesklé lepenky o tloušťce 0,1 až 1,0 mm tak, aby vznikly svazky tloušťky 20 až 40 mm, izolované od sebe lepenkou. Tím se zesílí izolace napříč plechy a omezí se tak vířivé proudy, které by se mohly uzavírat zejména okraji plechů, jež jsou po stříhání nerovné.



1. vrstva

2. vrstva

a)



1. vrstva

2. vrstva

b)

Obr. 65. Skládání magnetického obvodu trojfázového jádrového transformátoru

- a) z plechů válcovaných za tepla,
- b) z plechů válcovaných za studena

Transformátory velkých výkonů mají v jádře nebo i ve spojkách *olejové kanály*, které zlepšují chlazení. Mohou být podélné (obr. 66a) nebo příčné (obr. 66b).

Podélné kanály jsou konstrukčně výhodnější, ale jejich chladicí účinek je menší, neboť teplo do nich musí přestupovat přes izolaci mezi plechy.

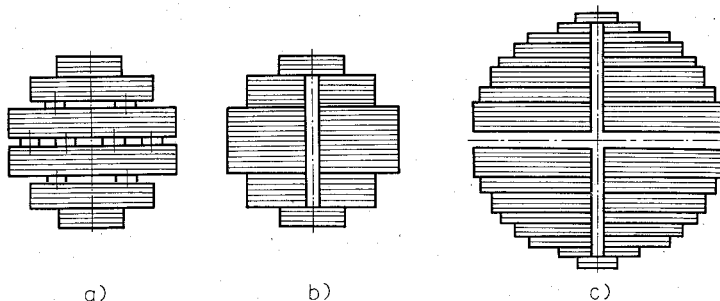
Příčné kanály se zhotovují hůře, jádro musí mít složitější stahovací konstrukci, ale jejich chladicí účinek je značně větší, neboť plechy jsou do nich obráceny svými hranami.

Šířka chladicích olejových kanálů bývá 10 mm. Udrží ji bakelitové válečky, zapuštěné a zalepené do otvorů v okrajových plechách. Původně

se používaly různé profilované ocelové rozpěrky, přivařené k okrajovým plechům.

Některé firmy dělají kanály kombinované (obr. 66c).

Donedávna se jádra stahovala *nýty* nebo *šrouby* s vhodně tvarovanými maticemi. Šrouby procházely otvory vyraženými v plechách a musely být od nich (vzhledem k vířivým proudům) dokonale izolovány. Otvory v jádře zmenšovaly účinný průřez jádra a zvětšovaly ztráty v železe.



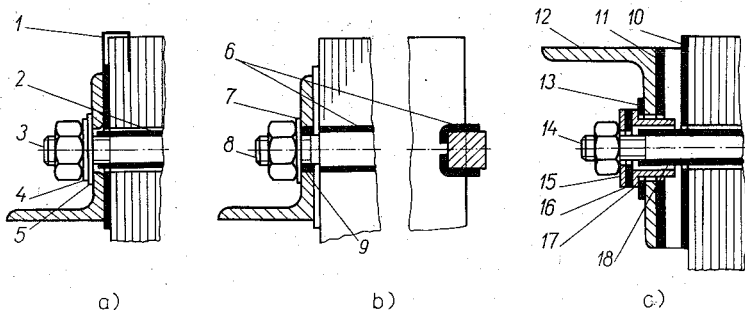
Obr. 66. Chladicí kanály v jádře transformátoru
a) podélné, méně účinné, ale technologicky výhodné, b) příčné, účinné,
technologicky nevýhodné, c) kombinované kanály, ACEC Charleroi

Dnes se už otvory v jádru nedělají. Jádro se stahuje vhodnými *bandážovacími páskami*. Pro velmi velké stroje a pro vzduchové transformátory se používá skleněná páska Res-i-glas (firma Micafil), která je napuštěná impregnační pryskyřicí. Po ovinutí se vytvrdí při teplotě 135 až 150 °C, a vytvoří tak velmi kompaktní a pevnou bandáž.

U olejových transformátorů stačí stažení i jednoduchou keprovou páskou, neboť ke stažení přispívá i vyklínování vinutí.

Spojky se stahují převážně válcovanými profily L a U nebo složitější svařovanou a vyztuženou konstrukcí. Počet stahovacích svorníků je co nejmenší, aby se průřez spojky s ohledem na ztráty co nejméně zeslaboval. Příklady konstrukcí jsou na obr. 67. Ocelové postranice i stahovací svorníky je třeba od aktivních plechů dokonale elektricky izolovat.

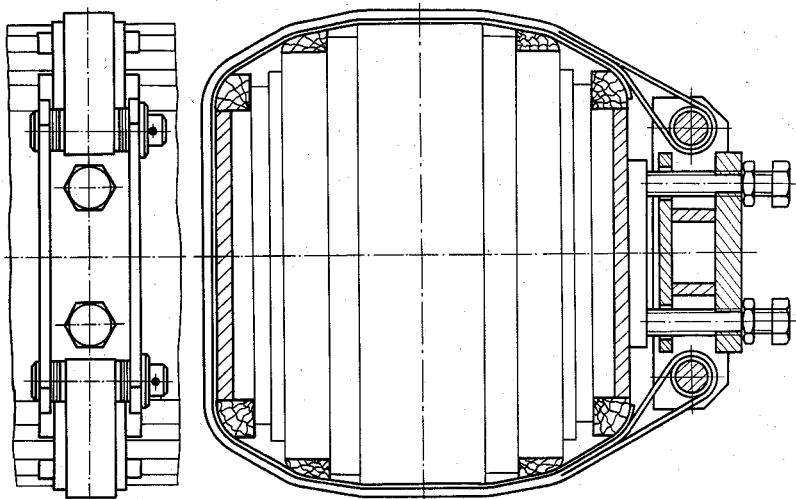
Abychom vyloučili jakékoli otvory ve spojkách, používá se nejnověji pro jejich stažení vrstvený ocelový pás, který spojku obepíná a dvěma odtlačovacími šrouby, které se opírají o její boční stěnu, je potřebným tlakem stahován (obr. 68).



Obr. 67. Detail stáhnutí spojky

a) střední stahovací svorník, b) izolování krajního stahovacího svorníku, c) vytvoření chladicího kanálu mezi spojkou a postranicí

1 – uzemňovací pásek, 2 – izolační trubka, 3 – svorník, 4 – ocelová podložka, 5 – izolační podložka, 6 – lepenková vložka, 7 – podložka, 8 – svorník, 9 – manžeta, 10 – lepenka, 11 – lepenková podložka, 12 – úhelník, 13 – izolační podložka, 14 – svorník, 15 – izolační podložka, 16 – ocelový náboj, 17 – trubky, 18 – olejový kanál



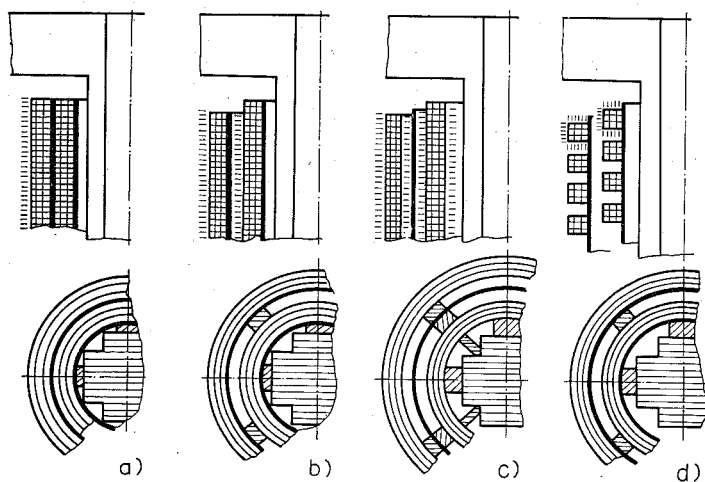
Obr. 68. Moderní stahování spojky vrstveným ocelovým pásem, BEZ Bratislava, n. p.

2.24.2. Konstrukce vinutí

a) Vodiče a izolace. Vinutí se zhotovuje převážně z hliníkových vodičů. Měděné vodiče se používají jen ve speciálních případech a u velkých výkonů.

Současné správně navržené a pečlivě vyrobené hliníkové vinutí transformátoru může mít i lepší vlastnosti než měděné vinutí klasického transformátoru. N. p. BEZ Bratislava vyrábí hliníkové transformátory do výkonu 10 MVA, ČKD Praha n. p. do výkonu 40 MVA a napětí 110 kV. Švédská firma ASEA vyrobila hliníkový transformátor o výkonu 250 MVA.

Hliníkový transformátor vychází zásadně těžší, neboť má větší magnetický obvod. Moderní orientované plechy umožňují tento rozdíl vyrovnat. Dnes už neplatí všeobecný údaj, že při stejných rozměrech je výkon transformátoru s hliníkovým vinutím jen 80 % výkonu transformátoru s měděným vinutím. Z tabulek maximálně možných rozměrů olejových transformátorů (uvedených v ČSN 35 1120), je vidět, že při stejném výkonu jsou rozměry transformátoru s hliníkovým vinutím jen nepatrně



Obr. 69. Zásadní uspořádání vinutí transformátorů

a) obě cívky chlazeny jen jedním povrchem, b) každá cívka chlazená svým vnějším povrchem, c) každá cívka chlazená oběma povrchy, d) cívky členěné chladičími kanály

větší. Problémem bylo spojování hliníkových vodičů navzájem a spojování hliníkových vodičů s měděnými vývody. Svařování v ochranné atmosféře tento problém úplně odstranilo.

Do průřezu asi 5 mm^2 se používá drátů kruhového průřezu, vodiče s větším průřezem jsou z plochých pásů, které lépe využívají prostor a umožňují lepší přestup tepla.

Transformátorky mívají vodiče vinutí izolované smaltem nebo opředené bavlnou.

Pro olejové transformátory se používá téměř výhradně papírová izolace. Jen dynamodráty se izolují olejovzdorným lakem. Při napětích menších než 100 kV se vinutí impregnuje ve vakuu lakem. Podle účelu transformátoru se impregnuje jednou až třikrát. Impregnace zvětšuje mechanickou pevnost vinutí. Při vyšších napětích je papírová izolace impregnována jen olejem. V tomto případě má asi o 15 % větší elektrickou pevnost než při impregnaci lakem.

Vzduchové transformátory mívají hliníkové pásy izolované skleněnou přízí, která je impregnována tereftalátovým lakem. Při velkých proudtech jsou hliníkové pásy bez izolace.

Tloušťku izolace určují další okolnosti: provozní napětí, druh a tepelná třída izolace, způsob impregnace, velikost napětí mezi závitů, požadované zkušební napětí, mechanické důvody a požadovaná spolehlivost.

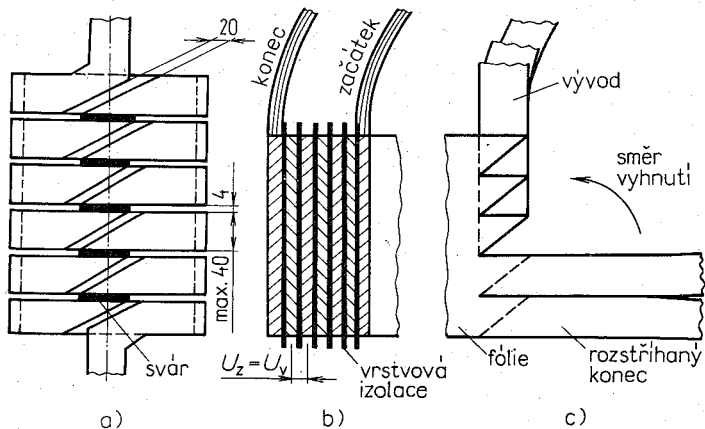
Nejmenší dovolená izolace je tvořena čtyřmi vrstvami papíru o tloušťce 0,075 mm.

Vodiče vstupních, uzlových a odbočkových cívek se obvykle izolují kvalitněji.

b) Celkové uspořádání. Celkové uspořádání vinutí závisí na napětí a na chladicích poměrech. V zásadě jsou cívky nižšího napětí uvnitř, blíž k železu. Jen cívky na velmi velké proudy jsou s ohledem na masivní vývody umístěny vně i při nižším napětí. Mezi cívky nižšího a vyššího napětí jsou vloženy izolační válce, popř. i olejové chladicí kanály. Jejich uspořádání je na obr. 69.

Názvosloví a přehled provedení podle ČSN 34 5127 jsou uvedeny v čl. 2.2.3 a na obr. 4, 5, 6.

c) Vinutí nízkého napětí. Vinutí nízkého napětí distribučních transformátorů je dimenzováno na větší proudy, proto je obvykle z plochých pásů.



Obr. 70. Zvláštní konstrukce cívek nn

a) schodová cívka, b) cívka z hliníkové fólie, c) vrstvený vývod z hliníkové fólie

α) Vinutí se zhotovuje jako *jednovrstvová* nebo *několikavrstvová* šroubovice. Pro spojení do lomené hvězdy musí být dvě samostatné šroubovice.

β) Pro vyšší výkony (do 1600 kVA) zejména pro vzduchové transformátory se používá vinutí z pásů vodiče – *schodové vinutí* – podle obr. 70. Cívka vznikne svařením potřebného počtu závitů vytvořených stočením hliníkového nebo měděného kosodélníkového pásu. Mezera mezi závity v místě propojení se u hliníku vyplní přídavným svařovacím materiálem, u mědi měděnou vložkou, spájenou natvrdo s oběma závity.

Cívka je buď *jednovrstvová*, nebo *několikavrstvová*. Nejobvyklejší je *dvouvrstvová* cívka s vrstvami zapojenými do série.

Cívka je velmi pevná, téměř úplně bez izolace, takže její chlazení je intenzivní. Izolace se obvykle vkládá do mezer mezi sousedními závity.

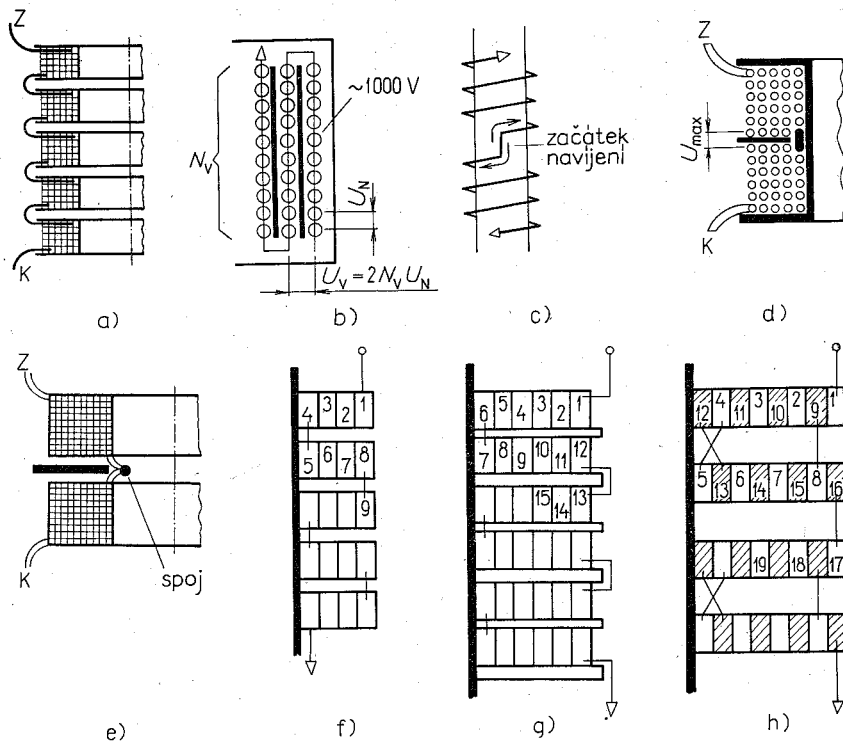
γ) Novinkou je vinutí z *hliníkových fólií*; poprvé bylo použito v USA v roce 1961. Vývojově se používá i u nás.

Fólie je široký a tenký pás, s poměrem stran až 1 : 2000. Cívka vznikne navíjením závitu na závit, přičemž izolace mezi vrstvami se navinuje společně s mezivrstvou izolací tak, jako se navíjejí kondenzátory, bez zvláštní závitové izolace (obr. 70b). Mnohvrstvá fóliová cívka umožňuje dokonalé využití prostoru a vhodné uspořádání vinutí, což zvláště přispívá k dalšímu zvýhodnění hliníkových transformátorů.

α) *Jednovrstvové* (předtím cívkové) vinutí vytvořené sériovým spojením několikavrstvových cívek (obr. 71a) je nejjednodušším původním vinutí vn nebo vvn. Podle velikosti proudu se vine z jednoho nebo z několika paralelně zapojených plochých vodičů.

d) Vinutí vysokého napětí. Pro malé proudy se zhotovuje z drátů vinutých různým způsobem.

α) *Jednovrstvové* (předtím cívkové) vinutí vytvořené sériovým spojením několikavrstvových cívek (obr. 71a) je nejjednodušším původním řešením. Celé vinutí se dělí na menší cívky, s ohledem na mezivrstevové napětí.



Obr. 71. Konstrukce cívek

a) sériové zapojení několikavrstvových jednocívek do sériového jednovrstvového vinutí vn, b) mezivrstevové napětí, c) postup navijení dvojcívky, d) dvojcívka v lepenkové kostře, e) dvojcívka bez kostry, f) deskové dvojcívky, g) jednovrstvové plynulé vinutí, h) jednovrstvové prokládané vinutí

Mezivrstevným napětím U_v se rozumí napětí, které odpovídá dvojnásobnému počtu závitů v jedné vrstvě ($U_v = 2N_v U_N$), obr. 71b.

Kdysi se vinutí dělalo tak, že na jednu cívku připadlo napětí asi 1000 V. Počet závitů v jedné vrstvě byl omezen dovoleným mezivrstevným napětím (100 až 200 V). Jednocívky (obr. 71a), navinuté na lepenkové kostry byly nevhodné proto, že začátek každé cívky musel procházet ze spodní vrstvy až na povrch, a musel se proto důkladně izolovat. Proto se raději dělávali výhodnější dvojcívky.

Dvojcívka je složena ze dvou polovin vinutých v opačném smyslu a zapojených tak, aby její začátek a konec byly vyvedeny na vnější straně (obr. 71c). Úprava v lepenkové kostře podle obr. 71d byla pracná, protože cívka se musela začít navíjet uprostřed. Výhodnější je řešení podle obr. 71e. Dvojcívka vzniká spojením vnitřních vývodů dvou samostatných stejných jednocívek otočených svými začátky k sobě. Oba začátky se spojí, a vznikne tak cívka, jejíž začátek i konec vycházejí v horní vrstvě.

U malých výkonů se cívky nasouvají jedna za druhou, mezi nimi se nedělají žádné chladičí kanály. Jsou-li potřebné, mohou se zhotovit dvojím způsobem:

- lepenkovými vložkami nasunutými na laťky z tvrzeného papíru,
- papírovými bandážemi, nažehlenými na několika místech obvodu cívky nebo dvojcívky.

Pro velkou pracnost se však dvojcívky nedělají. Dnes se za technologicky nejvýhodnější považuje vinutí z pěti nebo sedmi širokých jednocívek zapojených do série tak, že odbočková cívka je uprostřed. Spoje mezi cívkami se svařují v argónu a izolují izolační trubičkou.

β) Pro větší proudy se dělají *deskové dvojcívky* z plochých izolovaných pásů (obr. 71f). I tento druh cívek se v poslední době pro svou pracnost nepoužívá.

γ) Nejvíce používaným vinutím je *jednovrstevné plynulé* vinutí (dříve přesmyknuté nebo přesouvané vinutí). Cívka je po celé délce navinuta plynule jedním vodičem, bez spojování. Několik závitů plochého vodiče, navinutých na sebe, tvoří deskovou cívku. Zvláštním technologickým postupem při navinování se dosáhne toho, že začátky a konce vycházejí střídavě v horní a spodní vrstvě, takže spojování není třeba (obr. 71g). Vinutí dobře odolává zkratovým silám a je nejméně nákladné. Naproti tomu není nejvýhodnější s ohledem na rozložení napětí při rázu.

δ) *Mnohovrstvové* vinutí (dříve polohové) se skládá z několika vrstev, které vznikají navinutím jednoho závitu vedle druhého po celé délce cívky. Vrstvy mohou být vinuty v opačném smyslu (obr. 6b), tehdy mohou být navinuty plynule jedním vodičem, nebo souhlasně (obr. 6c), přičemž jejich sériové spojení se provede zvláštním propojením mimo cívky.

V prvním případě je maximální mezivrstevové napětí dvakrát větší než ve druhém případě.

Při vyšších napětích bývají délky vrstev odstupňovány tak, že vnější vrstvy jsou postupně kratší.

ε) Pro napětí vvn se používá *mnohovrstvové plynulé* vinutí podle obr. 5f.

φ) Mezi moderní vinutí, pro svou zvětšenou kapacitu příznivě namáhané při napětovém rázu, patří *překládané* vinutí podle obr. 71h. Skládá se z dvojčivek, z nichž každá je vinuta dvěma vodiči najednou. Jejich vývody se na vnitřních stranách propojí podle schématu. Kromě jednoduchého překládaného vinutí se používá i dvojité překládané vinutí, vinuté najednou čtyřmi vodiči.

e) Vystřídání paralelních větví. Vodiče většího průřezu (např. nad 30 mm²) se musí pro zmenšení přídavných ztrát dělit na paralelní větve. Výška jednotlivých vodičů se volí 3 až 5 mm a všechny vodiče jedné větve se ukládají na sebe (obr. 72a). Velké transformátory mohou mít i 30 paralelních větví.

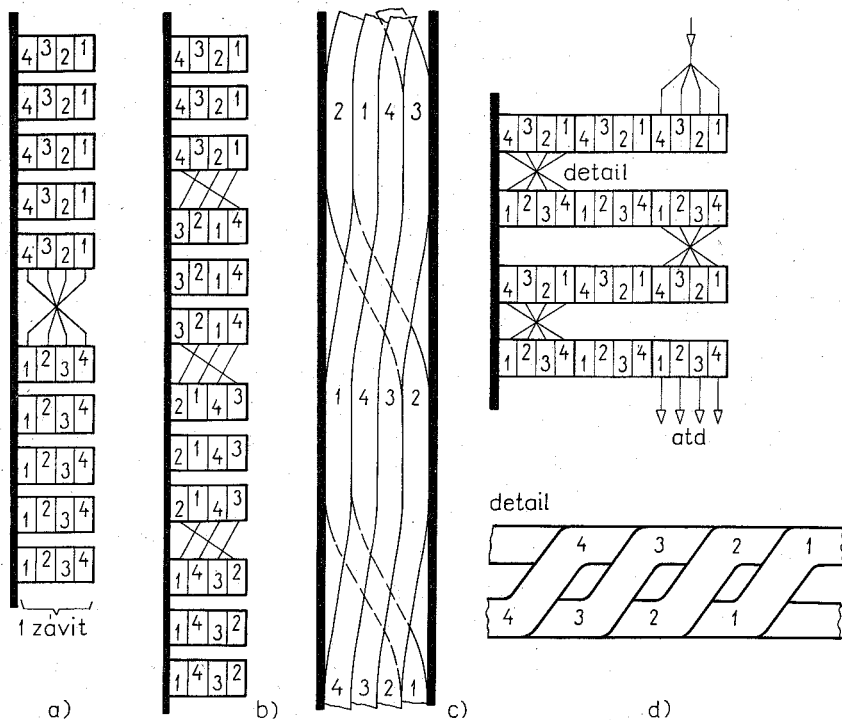
Reaktance jednotlivých větví není stejná, neboť nejsou spřaženy se stejným rozptylovým tokem. Větve vinuté ve vnitřní vrstvě, blíž k jádru, jsou spřaženy s větším magnetickým tokem než větve navinuté na vnějších vrstvách. V každé větvi se indukuje jiné napětí a větve se chovají jako paralelně zapojené zdroje s nestejným napětím. Mezi nimi procházejí vyrovnávací proudy. Aby se ve všech větvích indukovalo stejné napětí, musí se při navíjení vystřídát tak, aby každá z nich procházela všemi polohami a byla spřažena se stejným tokem.

Možné způsoby vystřídání jsou vyznačeny na obr. 72. Příklad zhotovení záhybu uprostřed dvouvrstevové cívky je na obr. 73.

f) Ochrana před účinky přepětí. Atmosférickými poruchami a spínacími pochody vznikají ve venkovním vedení přepětí, jejichž průběh má tvar strmé vlny, šířící se po vedení rychlostí světla. Velikost přepětí sice omezují bleskojistky a ochranná jiskřiště, ale neochrání úplně před

jeho účinky vinutí transformátoru, připojeného na vedení. Účinky přepětí závisí nejen na jeho velikosti, ale i na strmosti. Amplituda strmé vlny dosahuje až 2 MV.

Účinkem přepětí, které vznikne do vinutí, vzniknou velké potenciální rozdíly mezi vinutím a uzemněným jádrem a mezi samotnými závitů.

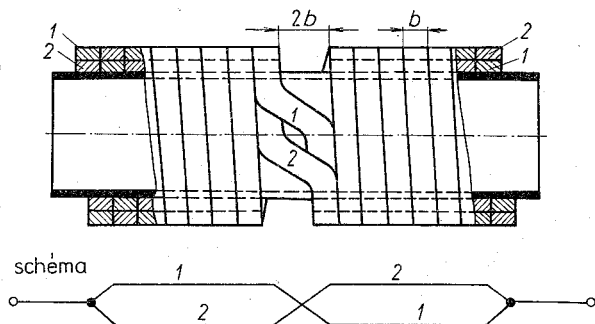


Obr. 72. Vystřídání paralelních vodičů

- a) jeden záhyb uprostřed cívky, b) záplet, předtím transpozice podle Punga, c) přesuvka ve svazku, předtím permutace ve svazku, d) přesmyčka, předtím inverze

Gradient elektrostatického pole mezi vinutím a magnetickým obvodem je největší v prostoru mezi okrajem vinutí a spojkou, neboť v tom místě je pole velmi nehomogenní. Proto se vkládají mezi konce vinutí a spojky tzv. *kapacitní kruhy* (potenciální prstence). Jsou to kovové prstence tloušťky 10 až 20 mm, se zaoblenými hranami, důkladně izolované a v jednom

místě rozříznuté, aby nevytvářely závit nakrátko. Nasunou se na sloup a spojí se s vinutím tak, že tvoří jeden jeho závit. Jejich úlohou je zajistit rovnoměrné rozložení elektrického pole na koncích vinutí a tím zmenšovat nebezpečí přeskočení při vzniku přepětí. Kromě toho přispívají i k mechanickému vyztužení vinutí.



Obr. 73. Cívka s jedním záhybem u vinutí se dvěma paralelními větvemi

g) Sestava vinutí. Při řešení sestavy vinutí musíme kromě uspořádání cívek vyřešit

α) zhotovení podpěr pod vinutím, jimiž se zajistí axiální stlačení vinutí,

β) izolaci mezi vinutími různých napětí, která je vytvořena buď soustavou pevných izolačních válců – *tvrdá izolace* (obr. 74a), nebo vznikne nabalením potřebné vrstvy impregnovaného izolačního papíru – tzv. *měkká izolace* (obr. 74b),

γ) oddělení vinutí od sebe,

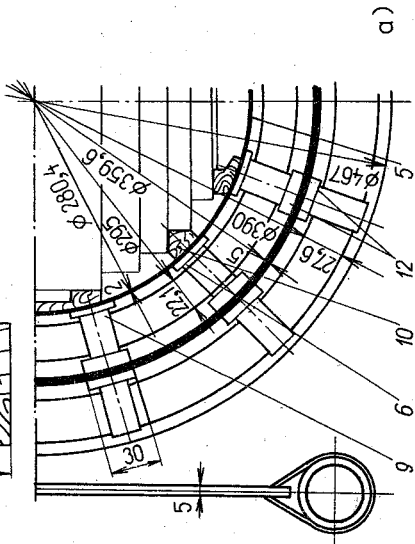
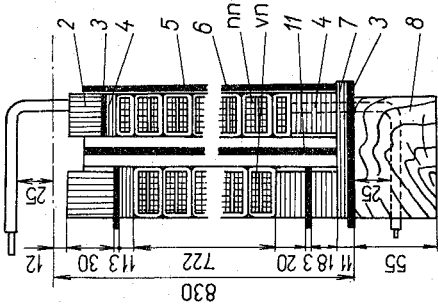
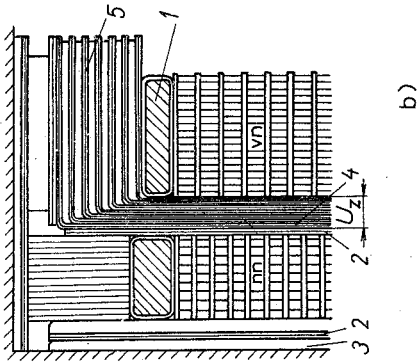
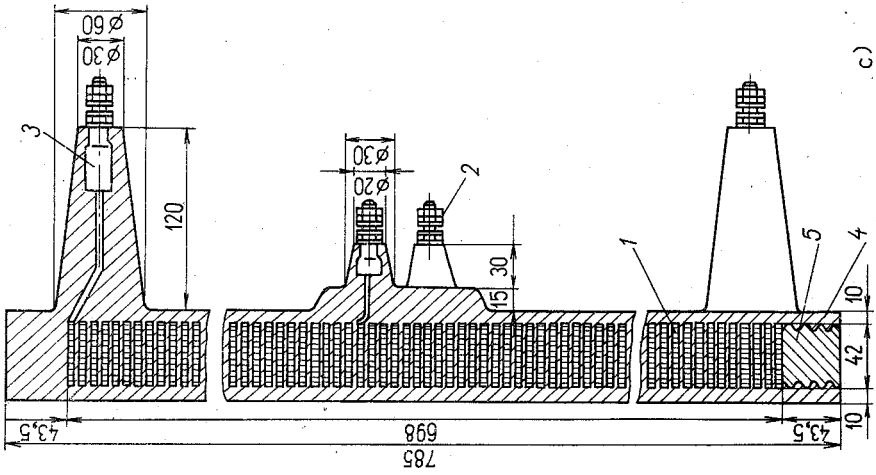
δ) izolaci vinutí proti jádru,

ε) izolaci vinutí proti spojkám.

Dílenský výkres sestavy vinutí menšího transformátoru je na obr. 74a.

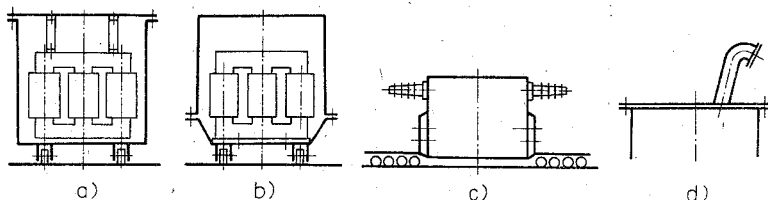
Na obr. 74b je sestava vinutí vvn. Aby izolační vzdálenosti mezi vinutím a spojkou nezvětšovaly celkovou výšku a tím i hmotnost transformátoru, jsou zmenšeny zesílením této izolace manžetami. Úpravu izolačních manžet řeší každá firma svým vlastním způsobem.

Na obr. 74c je řez plynule vinutou cívkou vn, zalitou do epoxidové pryskyřice. Vlastnosti pryskyřice jsou vylepšeny volbou vhodného plniva, např. mletého křemičitého písku nebo skelných vláknitých plniv.



Správnou polohu cívky během zalévání udržují sloupky vysoustružené ze ztvrdnuté zalévací hmoty, které dokonale se zalévací hmotou splnou a neporuší homogenitu.

Epoxidové zalévací látky umožňují vyrábět vinutí v izolační třídě B, popř. i F. U nás se používají do napětí 35 kV a výkonu 2500 kVA.



Obr. 75. Konstrukce nádoby

a) vanová, b) zvonová, c) samonosná, d) umístění výbušného ventilu

2.24.3. Konstrukce nádoby

Konstrukce nádoby závisí především na způsobu chlazení (odst. 2.23) a čím dál tím více je ovlivněna požadavky technologické účelnosti.

Nádoba může být

- a) vanová (obr. 75a),
- b) zvonová (obr. 75b),
- c) samonosná (obr. 75c).

Vanová nádoba je nejtradičnější, s jejím víkem jsou spojeny všechny aktivní části transformátoru a spolu s ním se i z nádoby vytahují. Víko se s přírubou nádoby spojuje šrouby, těsnění zajišťuje olejovzdorná pryž.

Obr. 74. Sestavy vinutí

a) vinutí transformátoru menšího výkonu

1 – mezistěna, 2 – tlačný kruh, 3 – izolační kotouč, 4 – horní tlačný kus, 5 – izolační válec, 6 – kanálová tyč, 7 – spodní tlačný kus, 8 – podpěra, 9 – distanční kus, 10 – distanční tyč, 11 – izolační válec, 12 – kanálová tyč,

b) zesílení izolace manžetami u cívky vvn – tzv. měkká izolace

1 – potenciální kapacitní prstenec, 2 – izolační válec z tvrdého papíru, 3 – distanční latky, 4 – balená měkká izolace, 5 – izolační manžety mezi vinutím a spojkou,

c) řez plynule vinutou cívkou vn zalitou do epoxidové pryskyřice

1 – závity z plochého vodiče, 2 – svorky pro přepínání odboček, 3 – přívodní svorník, 4 – epoxidová pryskyřice, 5 – podpěrný sloupek z vytvrzené pryskyřice

Její promáčknutí při dotahování šroubů znemožňuje ocelový drát o průměru 3 mm, přivařený na okraj příruby.

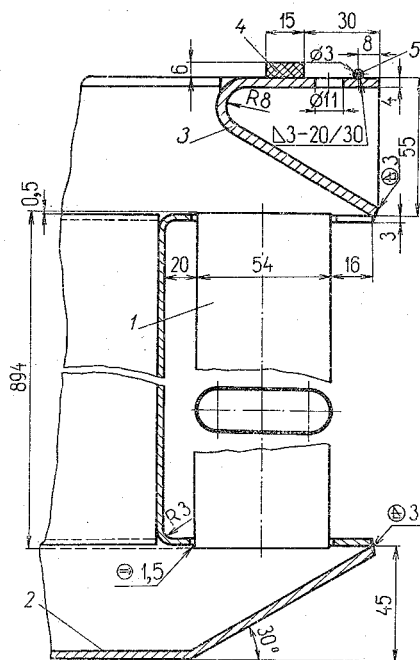
Zvonová nádoba má dělicí rovinu ve spodní části. Aktivní části jsou zakotveny v pevném spodním rámu, zdvihá se jen samotný zvon nádoby. Řešení je velmi vhodné pro velké výkony, neboť k revizi stačí jeřáb s menší nosností. Nádoba není aktivními částmi namáhána, dimenzována je jen na přetlak oleje (asi 60 kPa).

Samonosná nádoba je tak dimenzována a upravená, že při dopravě tvoří část transportního vozidla, např. vagónu.

Se spodním rámem nádoby je spojen podvozek umožňující pohyb transformátoru. Rozměry podvozku jsou v rozměrových normách transformátorů a v oborové normě ON 35 1495. Do výkonu 1600 kVA jsou kolečka přestavitelná pro příčný i podélný posuv při stejném rozchodu.

Transformátory nad 10 MVA mají kolečka se stejným rozchodem jako železnice (1435 mm).

Víko se vyrábí z ocelového plechu tloušťky 5 až 10 mm a je na něm upevněno toto normální příslušenství



Obr. 76. Konstrukce moderní nádoby s plochými oválnými trubkami, BEZ Bratislava, n. p.

1 – plochá oválná trubka, 2 – dno nádoby, 3 – přírubový plech, 4 – těsnění pod víkem, 5 – drát proti promáčknutí těsnění

- a) tři (nebo čtyři) průchodky vn,
- b) čtyři (nebo tři) průchodky nn,
- c) nálevka na olej,
- d) dvě zavařené teploměrné trubky sahající 100 mm (do 1600 kVA) nebo 250 mm (nad 2,5 mVA) pod víko,
- e) závěsné čepy pro zdvihání,
- f) přepínač odboček — jeden společný při přepínání v uzlu nebo pro každou fázi zvlášť při přepínání uprostřed vinutí,
- g) dilatační nádoba (konzervátor).

Velké transformátory mohou mít na víku upraven výbušný ventil, kterým se uvolní přetlak plynů vzniklých při prudké poruše uvnitř transformátoru (obr. 75d).

Na obr. 76 je výkres moderní nádoby s plochými oválnými trubkami, jimiž se nahrazují někdejší velmi pracné vlny.

2.24.4. Průchodky

Průchodky zabezpečují průchod proudy víkem transformátoru. Skládají se z průběžného svorníku, izolačního tělesa a upevňovacího zařízení.

Svorník je měděný s minimálním průměrem 12 mm.

Izolační těleso je do 35 kV porcelánové, u vyšších napětí kondenzátorové.

Kondenzátorové průchodky mají svorník obalený hlazeným válcem z bakelitového papíru, v němž je několik sousých válců ze staniolové fólie. Fólie dávají elektrickému poli mezi svorníkem a objímkou homogenní tvar a tím přispívají k rovnoměrnému zatížení izolace a jejímu dokonalému využití. Kondenzátorové těleso je pro venkovní provedení chráněno porcelánovým pouzdrem.

Kondenzátorové průchodky v různém provedení pro napětí 3,6 až 420 kV a proudy 250 až 10 000 A vyrábí v ČSSR na světové úrovni n. p. Gumon Bratislava.

2.24.5. Dilatační nádoba

Je to válcová plochá nádoba, upevněná na víku transformátoru nebo nesená zvláštní konstrukcí, spojená s nádobou tak, aby umožnila teplotní dilataci oleje při změnách teplot od -30°C do 100°C . Její objem je asi 9 až 10 % objemu oleje v nádobě.

Použitím dilatační nádoby se zmenšuje znehodnocování oleje okysličováním, neboť olej se v ní stýká se vzduchem na menší ploše a při nižší teplotě.

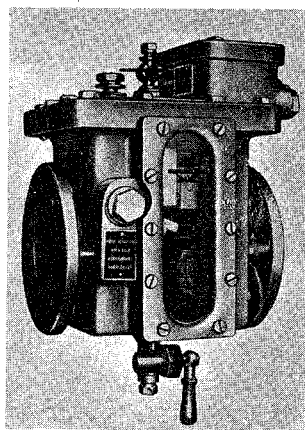
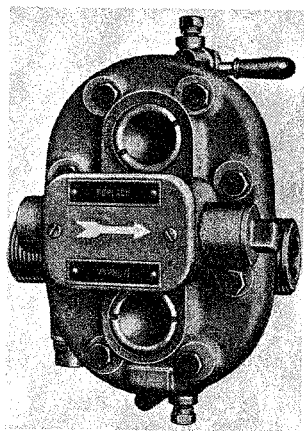
K příslušenství dilatační nádoby patří nálevka se zašroubovaným víčkem, skleněný nebo výhodnější ručkový olejoznak, odkalovací výpust a spojovací trubičky.

Ve víčku nálevky musí být odvzdušňovací dýchací otvor. Jeho ucpaní může vést k roztažení nádoby.

Do spojovacího potrubí mezi dilatační nádobou a nádobou transformátoru bývá u větších výkonů vložen mezikus, který lze nahradit plynovým (Buchholzovým) relé, sloužícím k ochraně transformátoru.

Plynové relé reaguje na vyvíjení plynu v oleji, způsobené místním přehřátím některé části transformátoru při přetížení vinutí nebo při poškození izolace. Kromě toho působí i při vniknutí vzduchu do oleje nebo při unikání oleje z nádoby při jejím poškození.

Má dvojici zapínacích kontaktů, které se používají k signalizaci nebo dávají popud k vypnutí transformátoru. Závady, které přímo neohrožují provozní bezpečnost, se jen signalizují (např. pomalé vyvíjení plynů, způsobené pomalým oteplováním některé vadné části), závady, které ohrožují bezpečnost, dávají impuls k okamžitému vypnutí transformátoru (prudký vývoj plynů, při němž začne proudit olej z nádoby transformátoru do dilatační nádoby apod.).



Obr. 77. Plynové Buchholzovo relé BR 1 a BR 2

Aby se vznikající plyny skutečně dostaly do plynového relé, musí mít víko transformátoru sklon asi 1 % a potrubí mezi nádobou transformátoru a dilatační nádobou ve vodorovné části sklon asi 2 až 4 %.

Na obr. 77 jsou dva typy u nás nejčastěji používaných plynových relé. Typ BR 1 se používá do výkonu 1600 kVA, typ BR 2 pro výkony větší.

Poznámka. Dilatační nádoby jako i ostatní příslušenství transformátorů jsou normalizovány v rámci RVHP.

2.25. TRANSFORMÁTOROVÝ OLEJ

2.25.1. Vlastnosti

Na kvalitě oleje závisí životnost a spolehlivost transformátoru. Jeho velkou nevýhodou je navlhavost; už sebemenší množství vody ho úplně znehodnocuje. Udává se, že půl promile vody v oleji zmenší jeho izolační pevnost na polovinu.

Transformátorový olej musí splňovat mnohé normami předepsané podmínky (ČSN 65 6845). Mezi nejdůležitější vlastnosti patří elektrická pevnost a kyselost.

2.26. NÁVRH TRANSFORMÁTORU

Při návrhu transformátoru se udává

výkon P [kVA],

vstupní a výstupní napětí U_1, U_2 [V],

kmitočet f [Hz],

zapojení a hodinový úhel,

způsob chlazení.

Kromě toho předepisují jednotlivé normy ještě tzv. zaručované hodnoty

ztráty ve vinutí ΔP_j [W],

ztráty v železe ΔP_{Fe} [W],

proud naprázdno I_0 v procentech jmenovitého proudu I_1 ,

napětí nakrátko u_k [%].

Zaručované hodnoty olejových transformátorů (s vinutím Al i Cu) jsou uvedeny v ČSN 35 1120, pro vzduchové transformátory v ČSN 35 1110. Jejich dovolené tolerance jsou v ČSN 35 1000.

Při návrhu musíme vzít v úvahu různé speciální požadavky, jako jsou např. skladované rozměry vodičů, rozměry plechových tabulí a pásů, existující přípravky a šablony apod. Zvláště důležitá je cena vodičů a cena železa, která určuje vhodný poměr mezi vinutím a jádrem, aby transformátor vyšel co nejekonomičtěji.

O konstrukci a návrhu rozhoduje i předepsané zkušební napětí, zvláště u transformátorů vvn a zvn.

Dnes se transformátor v zásadě navrhuje na počítači, který nám pomůže vybrat z velkého počtu variant to řešení, které je při dodržení zaručovaných hodnot nejvýhodnější.

2.26.1. Postup návrhu

Uveden je pouze návod pro školní návrh, který poslouží k opakování základních vztahů a k pochopení souvislosti mezi volenými a vypočítanými hodnotami.

1. Z daných zapojení se určí fázová napětí U_1 a U_2 .

2. Z tabulek zaručovaných hodnot zjistíme ztráty ΔP_j , ΔP_{Fe} , proud naprázdno I_0 , napětí nakrátko u_k (ČSN 35 1110, ČSN 35 1120) a jejich tolerance (ČSN 35 1000).

3. Z výkonu a z fázových napětí se určí fázové proudy I_1 a I_2 .

4. Aktivní průřez jádra můžeme určit z empirické rovnice

$$S_{Fe} = C \sqrt{\frac{P \cdot 10^3}{kf}} \cdot 10^{-4} \quad [\text{m}^2; \text{kVA}, \text{Hz}] \quad (108)$$

kde konstanta $C = 4$ až 6 pro přirozené olejové chlazení,

$C = 6$ až 8 pro vzduchové chlazení,

$k = 1$ pro jednofázový plášťový transformátor,

$k = 2$ pro jednofázový jádrový transformátor,

$k = 3$ pro trojfázový jádrový transformátor.

Volbou konstanty C můžeme ovlivnit poměr železa a mědi. Pro malé C je průřez menší; tomu odpovídá menší magnetický tok a větší počet závitů. Ztráty v železe vyjdou potom menší a ztráty v mědi větší, než je obvyklý průměr. To je výhodné u takových transformátorů, které často pracují naprázdno.

5. Geometrický průřez je větší, neboť mezi plechy je izolace a plechy k sobě těsně nepřiléhají. Zmenšení geometrického průřezu se

vyjadřuje činitelem plnění α , jehož velikost závisí na zpracování plechů a na druhu použité izolace. Činitel α bývá asi 0,87 až 0,94 pro plechy válcované za tepla a $\alpha = 0,96$ platí pro orientované plechy s keramickou izolací.

Geometrický průřez je dán vztahem

$$S_j = \frac{S_{Fe}}{\alpha} \quad (109)$$

6. Tvar průřezu se volí několikanásobně odstupňovaný. Jeho rozměry jsou dány násobkem průměru opsané kružnice d , který určíme z geometrického průřezu jádra poměrnými vztahy uvedenými na obr. 64.

Čím víc je průřez odstupňován, tím je dokonaleji využit. Ideální odstupňování se určuje na počítačích.

7. Vhodná magnetická indukce závisí na výkonu a můžeme ji určit z rovnice

$$B = 1,1 + 0,14 \log P \quad [T; \text{kVA}] \quad (110)$$

kteřá platí pro výkony do 5 MVA.

8. Magnetický tok

$$\Phi = BS_{Fe} \quad [\text{Wb}; T, \text{m}^2] \quad (111)$$

9. Počet závitů N_2 se určuje z napětí na jeden závit

$$U_{iN} = 4,44\Phi f \quad [V; \text{Wb}, \text{Hz}] \quad (112)$$

a je

$$N_2 = \frac{U_2}{U_{iN}} \quad (113)$$

Počet závitů se zaokrouhlí na celé číslo, u dvou vrstev (u lomené hvězdy) na celé sudé číslo.

10. Počet závitů N_1 určíme ze zaokrouhleného počtu závitů N_2 a převodu

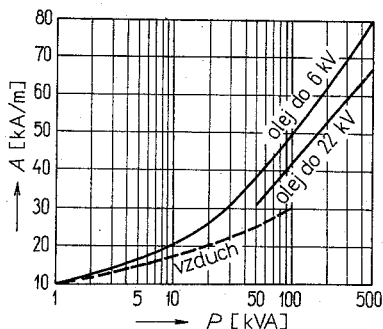
$$N_1 = N_2 \frac{U_1}{U_2} \quad (114)$$

Počet závitů se upřesní při návrhu vinutí a potom se dodatečně zkontroluje.

U lomené hvězdy je počet závitů

$$\left. \begin{aligned} N_2 &= 1,155 \frac{U_2}{U_1} \\ N_1 &= N_2 \frac{U_1}{1,155 U_2} \end{aligned} \right\} \quad (115)$$

11. Výška jádra závisí na proudovém zatížení povrchu železa A , které udává celkový proud připadající na 1 m výšky jádra. Toto proudové zatížení povrchu železa ovlivňuje chlazení a jeho dovolené hodnoty jsou v závislosti na výkonu vyneseny v diagramu na obr. 78.



Obr. 78. Proudové zatížení povrchu železa v závislosti na výkonu transformátoru

Pro jednofázový jádrový transformátor platí

$$A = \frac{0,5I_1N_1 + 0,5I_2N_2}{l} = \frac{I_1N_1}{l}$$

neboť na každém sloupu je polovina závitů N_1 a polovina závitů N_2 a platí

$$I_1N_1 = I_2N_2$$

Z toho vypočítáme výšku jádra jádrového transformátoru

$$l = \frac{I_1N_1}{A} \quad [\text{m}; \text{A}, \text{Am}^{-1}] \quad (116)$$

U trojfázového jádrového transformátoru je na každém sloupu plný počet závitů N_1 a N_2 , takže

$$A = \frac{I_1N_1 + I_2N_2}{l} = \frac{2I_1N_1}{l}$$

a z toho

$$l = \frac{2I_1 N_1}{A} \quad [\text{m}; \text{A}, \text{Am}^{-1}] \quad (117)$$

Rozměry jádra a cívek jsou na obr. 79.

12. Průřezy vinutí se určí pro vypočítané jmenovité proudy I_1 a I_2 z dovolené proudové hustoty, která je pro olejové transformátory dána vztahem

$$\sigma = (1,65 + 0,82 \log P) \cdot 10^6 \quad [\text{Am}^{-2}; \text{kVA}] \quad (118)$$

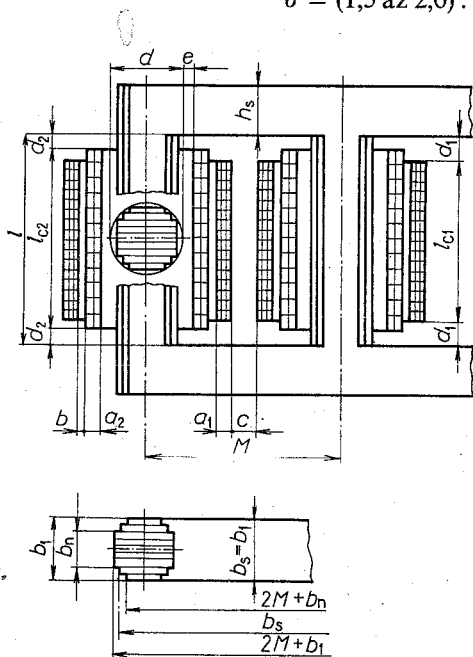
a pro vzduchové transformátory vztahem

$$\sigma = (1,2 + 0,4 \log P) \cdot 10^6 \quad [\text{Am}^{-2}, \text{kVA}] \quad (119)$$

Při zapojení do lomené hvězdy je třeba proudovou hustotu σ zmenšit 1,075krát.

Pro hliník se volí

$$\sigma = (1,5 \text{ až } 2,0) \cdot 10^6 \text{ Am}^{-2}$$



Obr. 79. Hlavní rozměry trojfázového transformátoru

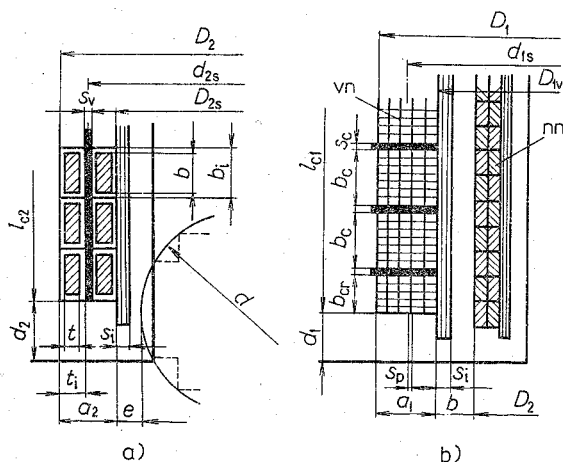
Proudová hustota vstupní i výstupní cívky bývá zpravidla stejná. Podle potřeby se však může upravit tak, aby obě cívky měly stejná oteplení.

Jednotlivé průřezy jsou potom

$$S_1 = \frac{I_1}{\sigma_1} \quad S_2 = \frac{I_2}{\sigma_2} \quad (120)$$

13. Profil vodiče a izolace se volí podle čl. 2.24.2. Rozměrové tabulky a izolační přírůstky vyráběných vodičů jsou ve třetím díle této učebnice.

Děláme-li paralelní větve (průřez nad 30 mm^2), musíme počítat s místem pro vystřídání vodičů. Při n větvích musí být $(n - 1)$ vystřídání o šířce dvou závitů.



Obr. 80. Úprava vinutí a jeho rozměry
a) cívky nn, b) cívky vn

14. Úprava vinutí nn je na obr. 80. Mezi vrstvy se vkládá mezi-vrstvová izolace představovaná lepenkou tloušťky $s_v = 0,2$ až $0,6 \text{ mm}$. Izolační vzdálenost e se volí podle průměru d a bývá v rozmezí 4 až 10 mm .

Izolační válec pod vinutím je tloušťky $s_i = 2$ až 3 mm .

Izolační vzdálenost od jádra se pro různá napětí určí ze vztahu

$$d_2 = U + 8 \text{ kV} \quad [\text{mm}; \text{kV}] \quad (121)$$

při napětí do 500 V bývá vzdálenost $d_2 \approx 15 \text{ mm}$.

Výška cívky je

$$l_{c2} = l - 2d_2 \quad (122)$$

Šířku plochého vodiče určíme tak, aby platilo

$$l_{c2} = (1,02 \text{ až } 1,15) (N_v + 2n_k + 1) b_i \quad (123)$$

kde N_v je počet závitů v jedné vrstvě,

n_k počet vystřídání paralelních vodičů,

b_i šířka izolovaného vodiče.

Konstanta (1,02 až 1,15) zahrnuje vůli mezi vodiči a nepřesnost při výrobě. Při výpočtu se počítá s tím, že na první závit vinutí jsou potřebné dvě šířky, proto je v závorce rovnice (123) jednička.

Šířka holého vodiče je po odečtení izolačního přírůstku b . Po zaokrouhlení na vyráběný rozměr se určí tloušťka vodiče t

$$t = \frac{S_2}{b} \quad (124)$$

kteřou také zaokrouhlíme.

Ze skutečné šířky vodiče b_i se vypočítá skutečná výška cívky (zpětně) podle rovnice (123) a ze skutečné izolační vzdálenosti d_2 (122).

Tloušťka cívky je

$$a_2 = (1,04 \text{ až } 1,08) [n_v t_i + s_v (n_v - 1)] \quad (125)$$

kde n_v je počet vrstev.

15. Úprava vinutí vn je naznačena na obr. 80b. Mezivrstevová izolace bývá $s_v = (0,1 \text{ až } 0,12) \text{ mm}$.

Izolační vzdálenost mezi vinutím vn a nn závisí na napětí a je dána vztahem

$$b = 0,5U + 5 \text{ kV} \quad [\text{mm}; \text{kV}] \quad (126)$$

Tloušťka izolačního válce je započítána v rozměru b a bývá při napětí

6 kV	1 × 2 mm
10 kV	1 × 2 mm
22 kV	1 × 3 mm
35 kV	1 × 5 mm
60 kV	2 × 6 mm
100 kV	1 × 8 mm + 2 × 6 mm
200 kV	1 × 8 mm + 3 × 6 mm

Vinutí s obvyklým řízením napětí v rozsahu $\pm 5\%$ má celkem $N_1 + 5\%$ závitů, která je třeba při klasické úpravě rozdělit do

a) jedné nebo dvou cívek odbočkových se zesílenou izolací, ve kterých bude celkově $2 \times 5\%$ z N_1 závitů,

b) jedné nebo několika vstupních cívek se zesílenou izolací, ve kterých bývá asi 10% všech závitů,

c) jedné cívky uzlové se zesílenou izolací při spojení do Y, která však odpadá, jestliže je odbočková cívka v uzlu, takže zastupuje uzlovou cívku; tato úprava je běžná do výkonu 315 kVA,

d) několika cívek normálních s normální izolací se upraví zbytek závitů.

Normální cívky se navrhují tak, aby na jedné cívce bylo napětí 1000 až 2000 V. Dělalí-li se dvojčívky, musí jich být sudý počet. Aby začátky a konce ve dvojčívce vycházely na různých stranách, musí být počet vrstev liché. Tak vyjdou mezi dvojčívkami krátké spoje.

Rozdělení závitů do cívek je třeba navrhnout tak, aby tloušťka všech cívek byla stejná. Dosáhneme toho vhodnou volbou počtu poloh a počtu závitů v jedné poloze. Volba se dělá zkusmo. Přitom můžeme počet závitů N_1 pozměnit, ale jen v takovém rozsahu, aby chyba převodu nepřekročila dovolenou odchylku $\pm 0,5\%$. Tuto chybu je nutné po skončení návrhu zkontrolovat výpočtem převodu. Jestliže je poslední poloha neúplná, je třeba to v předpise po vinutí vyznačit a udat počet závitů v plných polohách i v poslední neúplné poloze.

Při změněném počtu závitů u odbočkových i vstupních cívek můžeme stejně tloušťky a_1 dosáhnout změnou tloušťky mezivrstevové izolace.

Řídící závity se různě upravují. Buď se upraví jedna cívka s plným počtem $\pm 5\%$ řídicích závitů, nebo se zhotoví dvě odbočkové cívky, každá s 5% závitů. Někdy je vhodné vyrobit jednu cívku, která má $+5\%$ závitů a zbytek -5% závitů vyvést odbočkou z první normální cívky.

Mezi jednotlivé cívky se vkládají distanční vložky z lesklé lepenky tloušťky $s_c = 2$ až 3 mm nebo se dělají olejové kanály široké asi 6 mm.

Distančních vložek je o jednu méně než cívek.

Izolační vzdálenost od železa je podobně jako u cívky nn (121)

$$d_1 = U + 8 \text{ kV} \quad [\text{mm}; \text{kV}] \quad (127)$$

Výrobci ji upravují podle vlastních zkušeností.

Volná délka pro závit cívky vn je předběžně

$$l_{c1} = l - 2d_1 - n_{sc}s_c \quad (128)$$

Šířka cívky je

$$b_c = (1,03 \text{ až } 1,06) (N_v + 1) d_1 \quad (129)$$

a tloušťka cívky je

$$a_1 = (1,0 \text{ až } 1,04) [n_v d_1 + (n_v - 1) s_p] \quad (130)$$

Skutečná výška celé cívky vn je

$$l_{c1} = \Sigma b_c + n_{sc}s_c \quad (131)$$

kde n_{sc} je počet distančních vložek mezi cívkami,

d_1 průměr izolovaného vodiče.

Význam zbývajících označení je podle obr. 80b.

16. Vzdálenost os jader je podle obr. 79

$$M = d + c + 2(a_1 + a_2 + e + b) \quad (132)$$

kde c je izolační vzdálenost mezi vinutími dvou sousedních fází

$$c = 0,7U + 7kV \quad [\text{mm}; \text{kV}] \quad (133)$$

17. Spojka má šířku b_s rovnou šířce jádra b_1 (obr. 79). Při stejné indukci ve spojce jako v jádře je $S_j = S_{Fe}$ a výška spojky je

$$h_s = \frac{S_j}{b_s} \quad [\text{m}; \text{m}^2, \text{m}] \quad (134)$$

Po zaokrouhlení vypočítáme skutečný průřez spojky S_s (geometrický).

Někdy je třeba vzhledem k požadovaným ztrátám v železe zmenšit magnetickou indukci ve spojce. Potom její výšku vypočítáme z magnetického toku a z její šířky.

2.26.2. Kontrola návrhu

1. Kontrola převodu. Někdy je třeba při návrhu vinutí změnit počet závitů. Potom se musí kontrolovat chyba v převodu, která nesmí být větší než 0,5 %.

Zvlášť se vypočítá napěťový převod p_U a převod závitů p_N , takže chyba v převodu je dána výrazem

$$\Delta p = \frac{p_U - p_N}{p_U} 100 \quad [\%] \quad (135)$$

2. Hmotnost vinutí

$$m_1 = 1,05\pi d_{s1} N_1 S_1 \gamma \quad [\text{kg}; \text{m}, \text{m}^2, \text{kgm}^{-3}] \quad (136)$$

$$m_2 = \pi d_{s2} N_2 S_2 \gamma \quad (137)$$

kde $\gamma_{\text{Cu}} = 8890 \text{ kg m}^{-3}$

$\gamma_{\text{Al}} = 2700 \text{ kg m}^{-3}$

3. Odpor vinutí pro R_1 se určí z rovnic (66) a pro R_2 z rovnice (67). Činitel dodatečných ztrát masivních průřezů je dán rovnicí (68).

Odpor jedné fáze

$$R = R_1 + R_{21} \quad (138)$$

kde R_{21} je přepočtený odpor podle rovnice (31). Jen při spojení do lomené hvězdy je dán vztahem

$$R_{21} = R_2 \left(\frac{N_1}{N_2} 1,155 \right)^2 \quad (139)$$

4. Reaktance vinutí se vypočítá podle čl. 2.9.7. Za d_s se dosadí střední průměry d_{s1} a d_{s2} , podobně jako za l_c střední délky l_{c1} a l_{c2} .

5. Impedance jedné fáze je

$$Z = \sqrt{R^2 + X_c^2} \quad (140)$$

6. Napětí nakrátko je

$$U_k = I_1 Z \quad (141)$$

v procentech

$$u_k = \frac{U_k}{U_1} 100 \quad [\%; \text{V}] \quad (142)$$

Výsledek se porovná se zaručeným napětím nakrátko a v případě nevyhovujícího výsledku je třeba úpravu vinutí pozměnit a výpočet opakovat.

7. Celkové ztráty ve vinutí jsou

$$\Delta P_j = 3\Delta P_{j1} + 3\Delta P_{j2} \quad (143)$$

kde

$$\Delta P_{j1} = I_1^2 R_1 \quad \Delta P_{j2} = I_2^2 R_2 \quad (144)$$

Celkové ztráty musí vyhovovat zaručené hodnotě, v opačném případě se musí změnit průřez vinutí.

8. Hmotnost jader a spojek magnetického obvodu je

$$m_j = 3S_j l \alpha \gamma \quad [\text{kg}; \text{m}^2, \text{m}, -, \text{kg m}^{-3}] \quad (145)$$

$$m_s = 2S_s l_s \alpha \gamma \quad (146)$$

kde $\gamma = 7600 \text{ kg m}^{-3}$,

l_s je střední délka spojky podle obr. 79

$$l_s = 2M + \frac{b_1 + b_n}{2} \quad (147)$$

9. Skutečná magnetická indukce v železe je dána upraveným počtem závitů N_1 a napětím

$$B_j = \frac{U_1}{4,44 S_{Fe} f N_1} \quad [\text{T}; \text{V}, \text{m}^2, \text{Hz}, -] \quad (148)$$

$$B_s = B_j \frac{S_j}{S_s} \quad (149)$$

10. Ztráty v železe se vypočítají z měrných ztrát (obr. 14) podle rovnice (30).

11. Proud naprázdno je

$$I_0 = \sqrt{I_\mu^2 + I_{Fe}^2} \quad (150)$$

Magnetizační proud I_μ určíme z měrného budicího příkonu (obr. 13) podle rovnice (74) a ztrátový proud I_{Fe} určíme ze ztrát v železe podle rovnice (75).

12. Účinnost při jmenovitém zatížení a při $\cos \varphi = 1$ stanovíme podle (91), pro jiné poměry podle (92).

13. Trvalý proud nakrátko je

$$I_{1k} = \frac{U_1}{Z} \quad (151)$$

při účinníku

$$\cos \varphi_k = \frac{R}{Z} \quad (152)$$

2.26.3. Tepelný výpočet

Dále máme zkontrolovat oteplení cívek a železa vzhledem k oleji a z dovoleného oteplení určit rozměry nádoby. K tomu je třeba znát alespoň základy tepelných výpočtů, které jsou uvedeny ve třetím díle této učebnice.

Po určení rozměrů nádoby můžeme odhadnout objem dilatační nádoby (asi 10% objemu oleje v nádobě) a navrhnout její rozměry.

2.26.4. Mechanický výpočet

Stahovací konstrukce se dimenzuje tak, aby magnetický obvod byl stlačován tlakem 0,8 až 1,2 MPa.

Zdvihací čepy se dimenzují podle všeobecných zásad mechanických výpočtů podle tíhy zvedaných částí.

2.26.5. Předpis vinutí

Uvádějí se v něm všechny údaje potřebné ke zhotovení vinutí a charakteristické údaje o transformátoru. Zkušebna do tohoto předpisu odlišně vyznačí naměřené údaje a porovná je s vypočítanými a předešnými hodnotami. Závody mají pro tyto předpisy zvláštní formuláře.

3. INDUKČNÍ STROJE

3.1. ZÁKLADNÍ POJMY

3.1.1. Definice

Indukční (asynchronní) stroj je točivý elektrický stroj, jehož magnetický obvod je malou mezerou rozdělen na dvě části: *stator* a *rotor*. Obě části jsou opatřeny vinutím. Jedno vinutí (obvykle statorové) je připojeno na zdroj střídavého proudu a druhé (obvykle rotorové) je spojeno nakrátko a proud v něm vzniká elektromagnetickou indukci, podobně jako u transformátoru. Odtud název indukční stroj.

Nejčastějším druhem indukčního stroje je trojfázový indukční motor, který využívá silového působení statorového proudu (ze sítě) a rotorového proudu (indukovaného ve vinutí spojeném nakrátko).

Trojfázový indukční motor je jednoduchý, v provozu spolehlivý a nevyžaduje žádnou zvláštní obsluhu a údržbu. Vyrábí se v širokém rozsahu výkonů: od několika wattů až do 20 MW s velmi širokým rozsahem otáček od desítek otáček za minutu až po $100\,000\text{ min}^{-1}$.

3.1.2. Rozdělení

Indukční stroj může pracovat jako

a) indukční motor – přiváděná elektrická energie se v něm mění na mechanickou, a ta přemáhá odpor poháněného zařízení,

b) indukční generátor – za určitých podmínek může indukční motor sloužit k přeměně mechanické energie přiváděné na rotor na elektrickou energii odebíranou ze statorového vinutí,

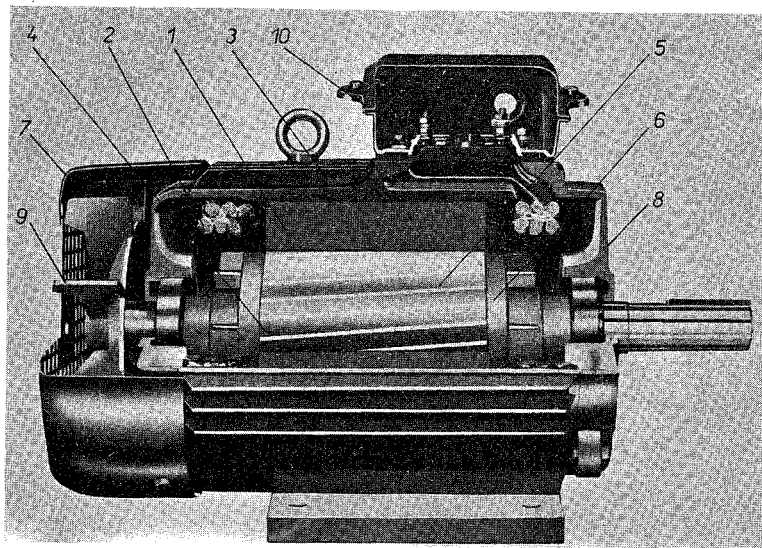
c) indukční brzda – k brzdění se využívá točivého momentu vznikajícího otáčením rotoru proti směru, kterým by se chtěl působením elektromagnetických sil otáčet,

d) indukční měnič kmitočtu – využívá změn kmitočtu proudu, indukovaného v otáčejícím se rotoru.

- Indukční motor může být podle statorového vinutí
- a) trojfázový,
 - b) jednofázový (pro malé výkony),
- a podle rotorového vinutí
- a) nakrátko
 - b) kroužkový.

Motor nakrátko má rotorové vinutí spojeno trvale nakrátko. Vinutí je zhotoveno z masivních tyčí, spojených po obou stranách vodičnými kruhy.

Kroužkový motor má na rotoru trojfázové vinutí. Začátky vinutí jsou vyvedeny na tři kroužky umístěné na hřídeli. Na kroužky dosedají uhlíkové sběrací kartáče, jejichž pomocí můžeme do rotorového vinutí zařadit vhodný odpor a tím zmenšit záběrný proud motoru nebo jeho otáčky a zvětšit záběrný moment.



Obr. 81. Řez trojfázovým zavřeným motorem s povrchovým chlazením,
VEM Wernigerode, NDR

- 1 – statorový svazek, 2 – statorové vinutí, 3 – žebrovaná kostra, 4 – rotor s klecí,
5 – tyče klece, 6 – kruhy klece, 7 – přední ložiskový štít, 8 – zadní ložiskový štít, 9 – vnější ventilátor, 10 – statorová svorkovnice

3.1.3. Popis trojfázového indukčního motoru s kotvou nakrátko

Řez moderním motorem s povrchovým chlazením je na obr. 81.

Hlavní části motoru s kotvou nakrátko jsou: statorový svazek, statorové vinutí, kostra, rotor s klecí, ložiska, ložiskové štíty, ventilátor a statorová svorkovnice.

Statorový svazek 1 tvoří mezikruží, složené z dynamových plechů tloušťky 0,5 mm. Jeho vnitřní obvod má drážky, ve kterých je uloženo trojfázové statorové vinutí 2, které po připojení na trojfázovou síť vybudí tzv. točivé magnetické pole. Toto pole vytváří točivý moment motoru. Statorový svazek je zalisován v litinové kostře 3, která dává motoru vnější tvar a umožňuje jeho připevnění k základu. Popisovaný motor má nejčastěji vodorovný patkový tvar. Kromě patek může mít motor i přírubu, která umožňuje jeho přímé spojení s poháněným strojem. Rotor 4 tvoří válec, složený také z dynamových plechů. Ty jsou u menších motorů nalisovány přímo na hřídel, u větších strojů jsou upevněny na rotorové nosné hvězdě. Rotor má na vnějším obvodu drážky vyplněné vodivými tyčemi 5. Tyče jsou po obou stranách spojeny vodivými kruhy 6 a tvoří dohromady tzv. rotorovou klec. Tyče i kruhy jsou nejčastěji z hliníku, který se nastříká do drážek a do zvláštních přiložených forem, ve kterých se vytvoří kruhy.

Rotor je od statoru oddělen malou vzduchovou mezerou a otáčí se působením točivého magnetického pole. Točivý moment se na poháněný stroj přenáší pomocí hřídele, který vyčnívá ze zadního ložiskového štítu. Hřídel je upraven tak, že se na něj může nasadit řemenice nebo jeden kotouč spojky.

Zadní štít motoru se nazývá ten štít, ze kterého vyčnívá hřídel. Tato strana se nazývá strana pohonu motoru. Přední ložiskový štít je na opačné straně pohonu.

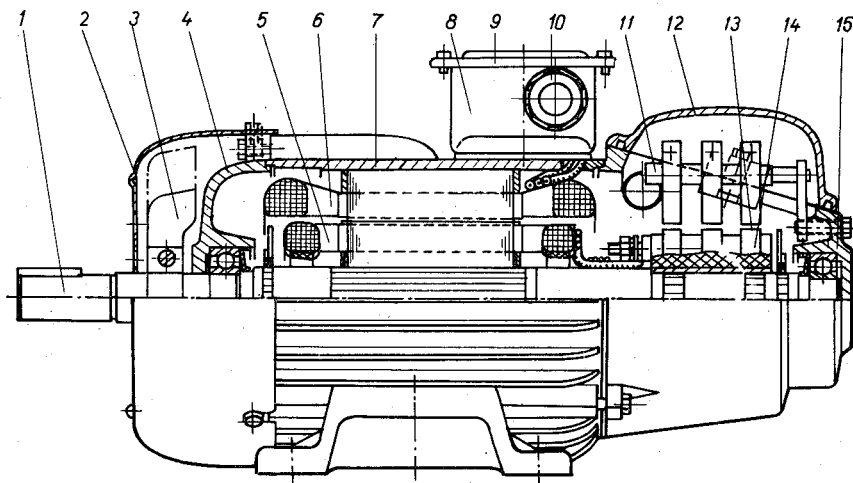
Hřídel je uložen ve dvou obvykle valivých ložiskách, která jsou upevněna v ložiskových štítech. Ložiskové štíty jsou svým tvarem přizpůsobeny tvaru statorové kostry a tvoří s ní jednotný celek.

Přívod proudu k vinutí umožňuje statorová svorkovnice 10, zakrytá lisovaným plechovým krytem.

Chlazení obstarává ventilátor 9, který je u zavřených motorů nasazen zvenku a upraven tak, že ofukuje proudem vzduchu její žebrovaný povrch.

3.1.4. Popis kroužkového motoru

Kroužkový motor (obr. 82) má v rotorových drážkách uloženo trojfázové vinutí trvale spojené do hvězdy nebo méně často do trojúhelníka. Vývody jednotlivých fází jsou připojeny na tři vodivé kroužky, izolovaně upevněné na hřídeli. Na kroužky dosedají uhlíkové kartáče, umístěné v držácích kartáčů. Držáky jsou vodivě spojeny se třemi svorkami rotorové svorkovnice, která bývá upevněna na předním ložiskovém štítu.



Obr. 82. Řez kroužkovým motorem

1 – hřídel, 2 – kryt ventilátoru, 3 – ventilátor, 4 – zadní ložiskový štít, 5 – rotorové vinutí, 6 – statorové vinutí, 7 – statorová kostra, 8 – svorkovnice, 9 – víčko svorkovnice, 10 – pancéřové ucpávky přívodních vodičů, 11 – držák kartáčů, 12 – kryt otvoru v ložiskovém štítu, 13 – kartáč, 14 – kroužek, 15 – přední ložiskový štít

Prostřednictvím sběracího mechanismu můžeme do obvodu rotorového vinutí zařadit proměnný odpor, kterým se zmenší velikost záběrného proudu při spouštění nebo kterým můžeme zmenšit otáčky motoru.

Stator je proveden stejně jako u motoru nakrátko.

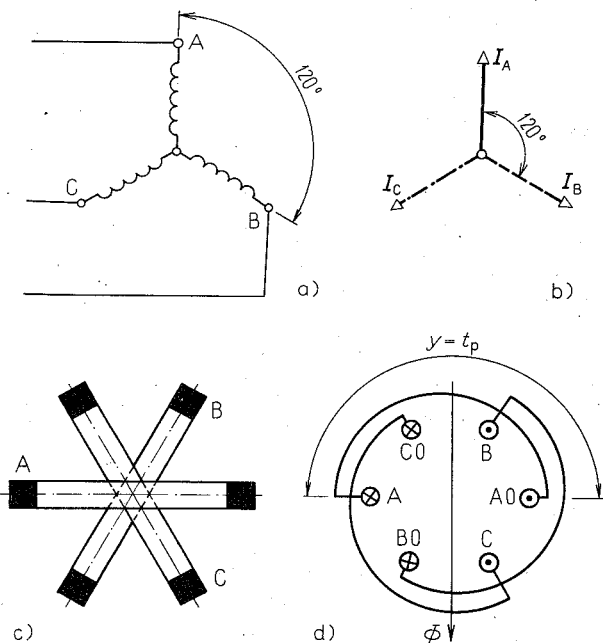
3.2. ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI INDUKČNÍCH MOTORŮ

3.2.1. Vznik točivého magnetického pole

Tažná síla indukčního motoru vzniká vzájemným působením točivého magnetického pole, které je výsledkem vzájemného působení dvou nebo několika střídavých magnetických polí vzájemně prostorově i časově posunutých, a magnetického pole rotoru.

Točivé magnetické pole můžeme vytvořit např. třemi stejnými válcovými cívkami, pootočenými navzájem o 120° , jestliže jsou napájeny trojfázovým proudem (obr. 83).

Úprava tří válcových cívek podle obr. 83 by byla nepraktická, cívky by zabíraly mnoho místa, prostor stroje by byl špatně využit. Proto se válcové cívky nahradí kotoučovými cívkami, jejichž roviny se protínají ve



Obr. 83. Uspořádání cívek pro vznik točivého pole

- a) schematické uspořádání tří válcových cívek, b) fázorový diagram napájecího proudu, c) zásadní uspořádání tří kotoučových cívek, d) skutečné uspořádání tří cívek na obvodu statoru

společné ose a jsou navzájem pootočený o 120° (obr. 83c). Aby čela cívek nepřekážela hřídeli stroje, jsou rozložena po obvodu stroje podle obr. 83d.

Vznik točivého magnetického pole vysvětluje obr. 84. Na obr. 84a je pro jednoduchost každá cívka zobrazena jen dvěma vodiči v řezu, označenými A–A0, B–B0, C–C0. Cívky jsou spojeny do hvězdy a napájeny třemi proudy I_A , I_B , I_C , posunutými navzájem o jednu třetinu kmitu (120° elektrických).

Na obr. 84b je nakreslen fázorový diagram proudů s jejich maximálními hodnotami. Proudů procházející jednotlivými cívkami mění svou velikost podle sinusovky od kladného maxima přes nulu k zápornému maximum a zpět. V cívkách vybudí tyto proudy magnetické toky, které se časem mění také sinusově a za předpokladu konstantní permeability prostředí jsou jejich okamžité hodnoty přímo úměrné okamžitým hodnotám proudů.

V dalších úvahách budeme okamžitou hodnotu proudu bez ohledu na měřítko považovat současně za okamžitou hodnotu jím vybudzeného magnetického toku.

Okamžité hodnoty proudů a magnetických toků v libovolném okamžiku zjistíme průmětem fázoru proudu do časové osy (t), kterou necháme otáčet úhlovým kmitočtem ω proti směru otáčení fázorů.

Začneme v okamžiku t_1 , v němž je proud v cívce A maximální a kladný. Z průmětu do časové osy je vidět, že proudy v cívkách B a C jsou záporné a oba se rovnají poloviční hodnotě proudu v cívce A

$$i_{B1} = i_{C1} = I_{\max} \cos 60^\circ = \frac{I_{\max}}{2}$$

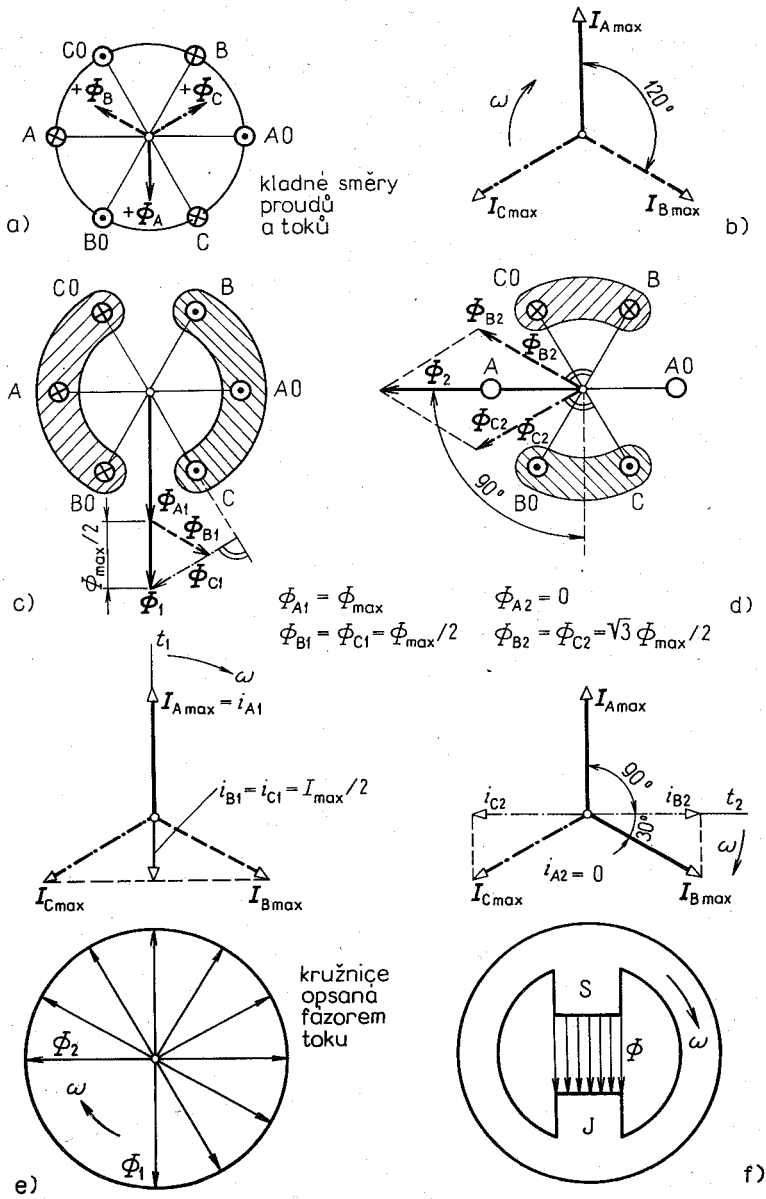
neboť amplitudy všech tří proudů jsou stejné

$$I_{A\max} = I_{B\max} = I_{C\max} = I_{\max}$$

Na obr. 84c jsou nakresleny okamžité směry proudů a jim odpovídající fázory magnetických toků. Jejich směry zjistíme pravidlem pravé ruky.

Magnetické toky všech tří cívek se sečtou a vytvoří výsledný magnetický tok Φ , daný jejich geometrickým součtem. Podle obr. 83c platí

$$\Phi_1 = \Phi_{A\max} + \frac{1}{2} \Phi_{A\max} = \frac{3}{2} \Phi_{A\max} = \frac{3}{2} \Phi_{\max}$$



Obr. 84. Vznik točivého magnetického pole

a) uspořádání cívkových stran, b) fázorový diagram proudu, c) rozložení proudů v okamžiku t_1 , d) rozložení proudů v okamžiku t_2 , e) kružnice opsaná fázorem výsledného magnetického toku, f) představa homogenního dvojpólového točivého pole

protože stejným amplitudám proudů odpovídají i stejné amplitudy magnetických toků

$$\Phi_{A \max} = \Phi_{B \max} = \Phi_{C \max} = \Phi_{\max}$$

Směr výsledného magnetického toku odpovídá rozložení proudových vrstev, tvořených vodiči (C0–A–B0) a (B–A0–C).

Podobně zjistíme velikost i směr výsledného magnetického toku např. v okamžiku t_2 (obr. 84d), který odpovídá právě jedné čtvrtině kmitu (90° el). Proud v cívce A (a tedy i její magnetický tok) je nulový, proudy v obou zbývajících cívkách jsou stejně velké, ale mají opačný směr. Jim odpovídající magnetické toky mají velikost

$$\Phi_{B2} = \Phi_{C2} = \Phi_{A \max} \cos 30^\circ = \Phi_{A \max} \frac{\sqrt{3}}{2}$$

a výsledný magnetický tok

$$\Phi_2 = 2\Phi_{B2} \cos 30^\circ = 2\Phi_{A \max} \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{3}{2} \Phi_{A \max} = \frac{3}{2} \Phi_{\max}$$

je stejně velký jako v prvním okamžiku.

Velikost výsledného magnetického toku se nezměnila, ale fázor výsledného magnetického toku Φ se pootočil o stejný úhel jako fázory proudů.

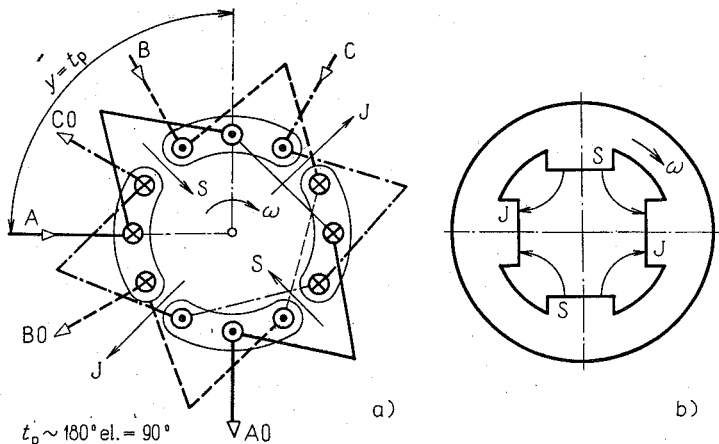
Ke stejnému výsledku bychom došli, kdybychom provedli podobné vyšetření v dalších okamžicích. Jednomu kmitu by odpovídala právě jedna otáčka výsledného fázoru magnetického toku.

Výsledek: výsledné magnetické pole vybuzené třemi cívkami pootočenými o 120° , napájenými trojfázovým proudem, se s časem nemění, ale jeho fázor se otáčí ve směru postupu fází stálým úhlovým kmitočtem ω , který závisí na kmitočtu napájecího proudu. Koncový bod fázoru výsledného magnetického toku opisuje kružnici (obr. 84e), a proto se nazývá točivé kruhové magnetické pole.

Kdybychom zaměnili přívody k libovolným dvěma cívkám, změnil by se směr otáčení magnetického pole.

Tři cívky vybudí dvoupólové pole

Dvoupólové homogenní točivé magnetické pole si můžeme představit např. jako věnec se dvěma pólovými nástavci z permanentního magnetu, který se otáčí kolem své osy stálým úhlovým kmitočtem ω (obr. 84f).

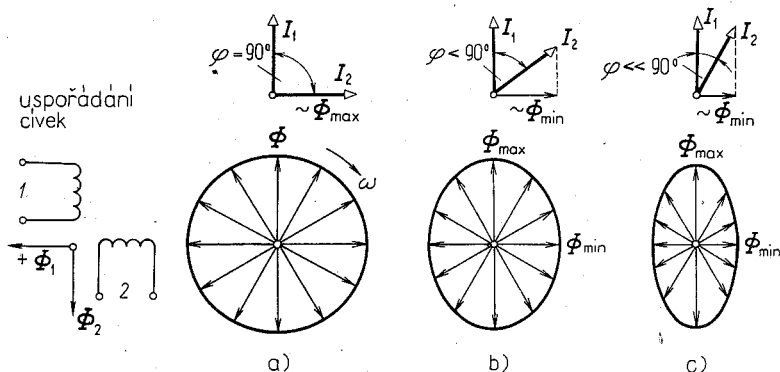


Obr. 85. Čtyřpólové točivé magnetické pole

a) rozložení proudů a os pólů v určitém okamžiku, b) představa čtyřpólového homogenního točivého pole

Několika vhodně zapojenými cívkami můžeme vybudit točivé pole několikapólové. Například šest cívek, ze kterých jsou vždy dvě zapojeny do série, vybudí točivé pole čtyřpólové, které si můžeme představit podle obr. 85.

Kruhové točivé pole můžeme vybudit i dvěma cívkami pootočenými proti sobě o 90° , jestliže jsou napájeny dvěma proudy posunutými proti sobě také o 90° elektrických (obr. 86a).



Obr. 86. Různé tvary točivého magnetického pole

Jestliže fázový posun obou proudů je menší než 90° el, vzniká eliptické točivé magnetické pole. Fázor magnetického toku se otáčí úhlovým kmitočtem ω , ale jeho velikost se plynule mění mezi Φ_{\max} a Φ_{\min} . Jeho koncový bod opisuje elipsu, která je tím užší, čím menší je posun mezi proudy (obr. 86b, c).

3.2.2. Synchronní otáčky

Otáčky točivého magnetického pole se nazývají synchronní otáčky, neboť přímo (synchronně) závisí na kmitočtu napájecího proudu, a tedy i na otáčkách generátoru, který je jeho zdrojem.

Dvoupólové magnetické pole vykoná za jeden kmit jednu otáčku, která odpovídá dvěma pólovým roztečím. Pólovou roztečí se rozumí vzdálenost os dvou sousedních pólů. Za jednu sekundu se tedy otáčky rovnají kmitočtu f a za jednu minutu jsou synchronní otáčky dány vztahem

$$n_s = 60f \quad [\text{min}^{-1}; \text{Hz}]$$

Čtyřpólové pole se za jeden kmit otočí také o dvě pólové rozteče, které však odpovídají jen jedné polovině otáčky, takže jeho synchronní otáčky jsou poloviční

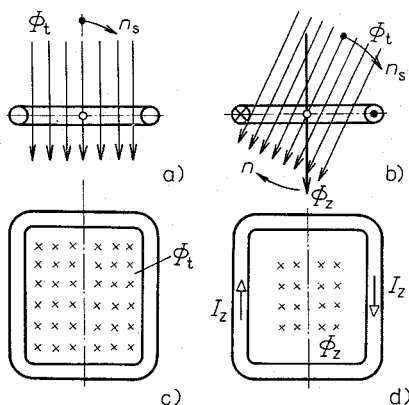
$$n_s = \frac{60f}{2}$$

Obecně má-li točivé magnetické pole $2p$ pólů, kde p je tzv. počet pólových dvojic (S – J), jsou jeho synchronní otáčky

$$n_s = \frac{60f}{p} \quad [\text{min}^{-1}; \text{Hz}] \quad (153)$$

3.2.3. Vznik tažné síly

Nejjednodušší rotor indukčního motoru je tvořen jedním závitem spojeným nakrátko, který je vložen do točivého magnetického pole (obr. 87). Velikost magnetického toku procházejícího plochou stojícího závitu se během otáčení točivého magnetického pole mění. Změnou magnetického toku se v závitu indukuje napětí, které jím protlačuje značný proud. Tento proud vybudí své magnetické pole, které spolu s točivým polem statoru vytvoří točivý moment.



Obr. 87. Závít v točivém magnetickém poli

Indukční motor se takto sám roztočí, což je jeho velkou výhodou.

Dostane-li se např. točivé magnetické pole z polohy na obr. 86a do polohy na obr. 87b, zmenšuje se magnetický tok procházející plochou závitu.

Zmenšováním magnetického toku se v závitu indukují napětí, které jím protlačuje proud I_z , jehož smysl je vyznačen na obr. 86b. Podle Lencova pravidla musí být takový, aby jím vybuzený magnetický tok Φ_z vyrovnával zmenšování magnetického toku, který prochází plochou závitu. Z obr. 87b je vidět, že točivé magnetické pole Φ_t unáší závit sebou a tím se závit dostává do točivého pohybu shodného s pohybem točivého magnetického pole. I když se závit vlivem setrvačnosti ihned neroztočí, zůstává smysl síly stále stejný, neboť smysl indukovaného napětí, proudu a jeho magnetického toku se přizpůsobuje okamžité poloze točivého magnetického pole.

Aby se tažná síla motoru zvětšila a jeho tah byl rovnoměrnější, nahradí se jediný rotorový závit několika tyčemi, které jsou dvěma čelními kruhy spojeny nakrátko a tvoří s nimi rotorovou klec, nebo se používá vinutý rotor s několika cívkami.

3.2.4. Otáčky rotoru a skluz

Budeme-li uvažovat ideální indukční motor bez jakýchkoli mechanických ztrát, roztočí se jeho rotor po rozběhu na synchronní otáčky a bude se otáčet souhlasně s točivým magnetickým polem. Jeho vodiče neprotínají žádné indukční čáry a neindukuje se v nich proud. Točivý moment by byl nulový a rotor by se dál otáčel jen setrvačností.

Jestliže se však rotor mechanicky zatíží, musí se zpomalit, takže indukční čáry protínají vodiče, ve kterých se indukuje proud potřebný pro vznik tažné síly. Čím více se motor zatíží, tím větší musí být rotorový proud, a tedy tím pomaleji se musí rotor otáčet.

S rostoucím zatížením se otáčky indukčního motoru zmenšují.

Poměrný pokles otáček rotoru n vzhledem k otáčkám točivého magnetického pole n_s se nazývá *skluz*

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (154)$$

a udává se obvykle v procentech

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \quad [\%] \quad (155)$$

Skluz bývá podle odporu rotorového vinutí v rozmezí 1 až 10 %, průměrně asi 5 %. Malé motory mají skluz větší než velké motory.

Protože se rotor indukčního motoru neotáčí synchronními otáčkami, nazývá se také *asynchronní motor*.

Příklad 10

Jaký skluz má čtyřpólový indukční motor při 50 Hz, jestliže otáčky rotoru jsou 1400 min^{-1} ?

Synchronní otáčky jsou

$$n_s = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ min}^{-1}$$

a skluz

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1500 - 1400}{1500} = 0,0666$$

nebo v procentech

$$s = \frac{1500 - 1400}{1500} \cdot 100 = 6,66 \%$$

Příklad 11

Jaké otáčky má šestipólový motor při skluzu 5 % a při kmitočtu 50 Hz?

Synchronní otáčky

$$n_s = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 100}{3} = 2000 \text{ min}^{-1}$$

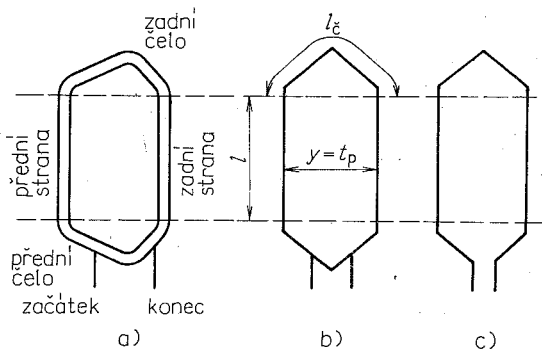
$$n = n_s - n_s \frac{s}{100} = n_s \left(1 - \frac{s}{100} \right) = 2000(1 - 0,05) = 1900 \text{ min}^{-1}$$

3.3. TROJFÁZOVÉ VINUTÍ

3.3.1. Základní pojmy a vztahy

Úkolem vinutí indukčních motorů je vybudit magnetické točivé pole se žadáným počtem pólů, které určují otáčky motoru.

Základním prvkem vinutí je cívka, která může mít různý počet závitů a různý tvar. Ty části cívky, které jsou uloženy v drážkách, se nazývají cívkové strany. Obě cívkové strany jsou spojeny čely (obr. 88a).

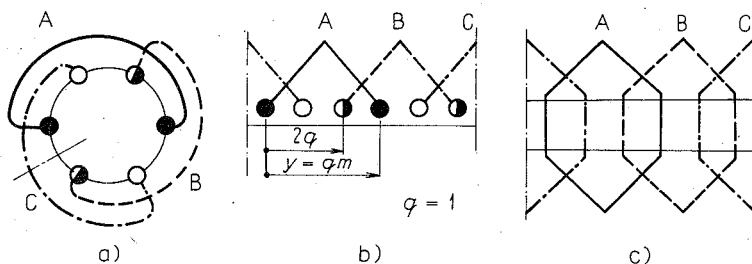


Obr. 88. Cívky vinutí
a) cívka s několika závity,
b) její schéma, c) cívka
s jedním závitem

Ve schématech se i cívky s několika závity kreslí jen jednou čarou (obr. 88b). Má-li cívka jediný závit (tyčové vinutí), kreslí se podle obr. 88c.

Čela cívek jsou formována tak, aby sledovala obvod stroje a nepřekážela rotoru v otáčení. Tvar a uspořádání čel závisí na druhu vinutí.

Schematicky můžeme vinutí zobrazit třemi způsoby, které jsou vyznačeny na obr. 89 pro nejjednodušší vinutí se třemi cívkami.



Obr. 89. Zobrazování vinutí

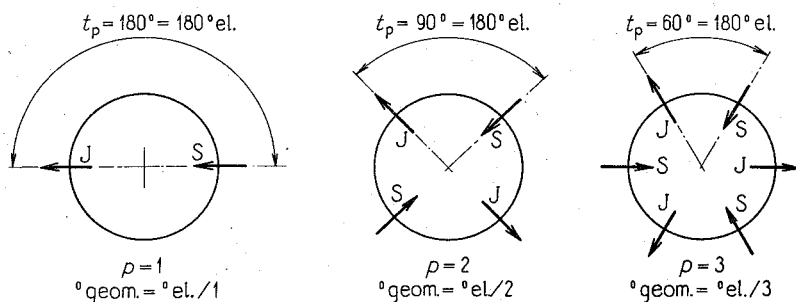
Pro lepší přehlednost se cívky jednotlivých fází rozlišují různou čarou a podobně se graficky rozlišují drážky různých fází.

V souvislosti s vinutím budeme používat toto označení

- m počet fází,
- p počet pólových dvojic,
- Q celkový počet drážek,
- Q_p celkový počet drážek na jeden pól,
- n_c počet cívek,
- q počet drážek na pól a fázi,
- t_p pólová rozteč (vzdálenost os dvou sousedních pólů),
- y cívkový krok (rozteč dvou cívkových stran téže cívky).

Aby bylo vinutí co nejlépe využito, musí se cívkový krok rovnat pólové rozteči ($y = t_p$). Jen u některých druhů vinutí se dělá z různých důvodů mírně zkrácený nebo (méně často) i mírně prodloužený.

U dvoupólového stroje odpovídá pólová rozteč geometrickému úhlu 180° . U čtyřpólového stroje úhlu 90° .



Obr. 90. Vztah mezi geometrickými a elektrickými stupni

Protože ale posun točivého pole o dvě pólové rozteče odpovídá vždy jednomu celému kmitu (360° el), udává se jedna pólová rozteč úhlem 180° elektrických a podobně v elektrických stupních se udávají všechny zbývající úhlové míry.

Mezi geometrickými a elektrickými stupni platí pro různý počet pólů vztah (obr. 90)

$$\text{geometrické stupně} = \frac{\text{elektrické stupně}}{p} \quad (156)$$

Počet drážek na pól a fázi q představuje nejcharakterističtější údaj o vinutí, ze kterého vycházíme při jeho návrhu.

Nejjednodušší vinutí se šesti drážkami má

$$q = \frac{6}{2 \cdot 3} = 1 \text{ drážku na pól a fázi.}$$

Vinutí s $q = 1$ se nepoužívá.

Při známém počtu drážek na pól a fázi je celkový počet drážek stroje

$$Q = q2pm \quad (157)$$

a při známém Q je počet drážek na pól a fázi

$$q = \frac{Q}{2pm} \quad (158)$$

Cívkový krok y a pólová rozteč se výhodně udávají v počtu drážkových roztečí. Tzv. plný krok je dán vztahem

$$y = t_p = qm \quad (159)$$

Dvě pólové rozteče odpovídají 360° elektrickým neboli $2qm$ drážkovým roztečím ($2p = 2$). Začátky jednotlivých fází musí být proti sobě posunuty o 120° elektrických

$$120^\circ \text{ el} = \frac{360^\circ \text{ el}}{3} = \frac{2qm}{3}$$

a pro obvyklý počet fází $m = 3$ dostaneme po zkrácení

$$120^\circ \text{ el} = 2q \text{ drážkových roztečí} \quad (160)$$

Poučka

Z porovnání dosud kreslených schémat vinutí vyplývá, že se po obvodu stroje střídají drážky s předními cívkovými stranami (kladnými) a drážky se zadními cívkovými stranami (zápornými) v pořadí fází

$$A, -C, B, -A, C, -B$$

Jestliže má vinutí q drážek na pól a fázi, střídá se postupně q drážek A, q drážek $-C$, q drážek B atd.

Z této poučky vycházíme při návrhu vinutí.

Upozornění

Dosud jsme v drážkách kreslili jen smysly proudů a na obrázku jsme vyznačovali osy pólů vybuzených těmito proudy. Pro posouzení správnosti vinutí a jeho zapojení se zakreslují do drážek smysly napětí, která jsou do vinutí indukována pohybem točivého magnetického pole. Tyto směry se kreslí pro libovolně zvolený okamžik, obvykle pro ten, ve kterém je napětí U_{iA} maximální a kladné, U_{iB} i U_{iC} stejně velké, záporné a rovnající se polovině napětí U_{iA} (obr. 91).

Přední cívkové strany označujeme znaménkem plus (+), zadní strany znaménkem minus (-).

Kladné indukované napětí je orientováno od začátku vinutí k jeho konci, záporné naopak.

Při správně navrženém a zapojeném vinutí leží potom drážky se stejným směrem indukovaných napětí vedle sebe. To odpovídá skutečnosti, že ve všech vodičích pod jedním pólem se indukuje napětí stejného směru. Jednotlivé póly můžeme potom nakreslit vždy v rozpětí drážek se stejným směrem indukovaných napětí.

3.3.2. Rozdělení střídavých vinutí

Vinutí rozdělujeme podle několika hledisek

1. Podle tvaru cívek

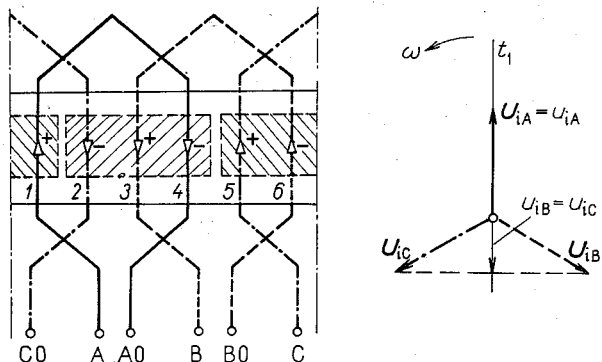
- a) se stejnými cívkami,
- b) se soustřednými cívkami, q nebo $q/2$ soustředných cívek tvoří cívkový svazek.

2. Podle uložení cívkových stran

- a) jednovrstvové, v každé drážce je jen jedna cívková strana, počet všech cívek je roven $Q/2$,
- b) dvouvrstevové, v každé drážce jsou dvě cívkové strany dvou různých cívek, každá cívka má jednu stranu v horní a druhou stranu ve spodní vrstvě drážky, počet cívek se rovná počtu drážek.

3. Podle cívkového kroku

- a) s plným krokem ($y = t_p$),
- b) se zkráceným krokem ($y < t_p$).



Obr. 91. Napětí indukované pod póly vinutí

4. Podle počtu drážek na pól a fázi

- a) vinutí s celistvým počtem drážek na pól a fázi,
- b) vinutí se zlomkovým počtem drážek na pól a fázi.

5. Podle uspořádání

- a) skupinové – cívky jednotlivých fází tvoří skupiny
 - a1) pól párové – jednu fázi tvoří p cívkových skupin,
 - a2) pólové – fázi tvoří $2p$ cívkových skupin,
- b) rozložené – vzniklé rozstřiháním původních stejnosměrných vinutí.

3.3.3. Jednovrstvová vinutí

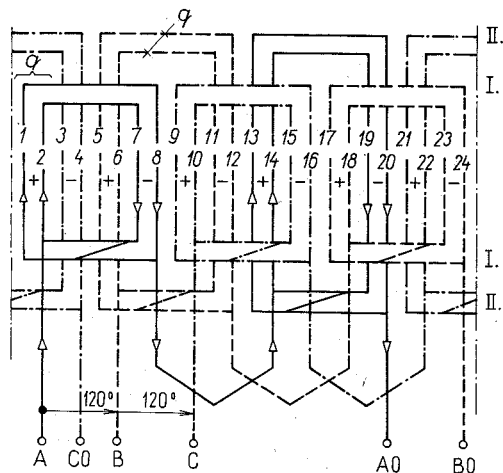
Z většího počtu možných druhů stejnosměrných vinutí se dnes používají jen některá

a) Soustředné vinutí – pól párové, dvoupolohové

Patří k prvním, ale dnes ještě používaným druhům vinutí. Používá se pro svou jednoduchost zejména u kusové výroby. Je upraveno tak, že q soustředných cívek s nestejným krokem tvoří cívkový svazek (obr. 92), čela cívek v jednom svazku jsou obvykle společně izolována. Upravena jsou do dvou poloh (pater). Při výrobě se nejdříve uloží v drážkách cívkové svazky s čely v první poloze (I), blíž k železu a až potom se uloží

svazky s čely ve druhé poloze (II), dále od železa. Každá fáze má p svazků, z toho $p/2$ v první a $p/2$ ve druhé poloze.

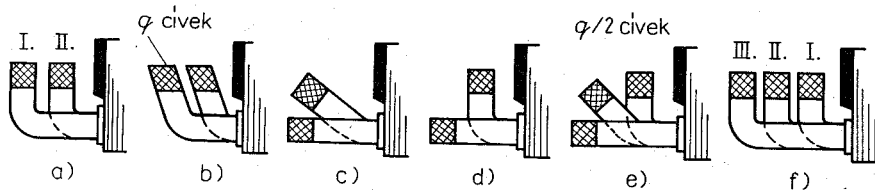
Čela mohou být upravena rovnoběžně nebo vějířovitě (obr. 93a, b, c, d). Rovnoběžná čela má obvykle šablonové vinití na vysoké napětí; vějířovitá úprava, u níž jsou všechny cívkové svazky stejně dlouhé, se používá u menších indukčních motorů s ručně vyráběným vinitím.



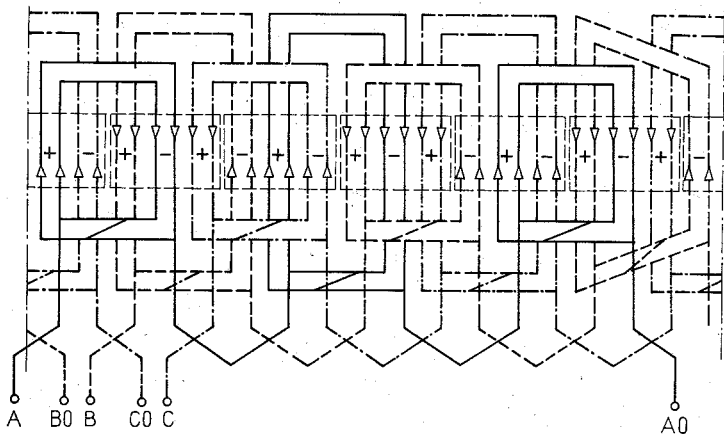
Obr. 92. Soustředné vinití –
pólpárové, dvupolohové:
 $2p = 4, q = 2, m = 3, Q = 24$

Cívky vinití na vysoké napětí se zhotovují jednotlivě na šabloně, každá se zvlášť izoluje, impregnuje a po jedné vkládá do otevřené drážky stroje.

Při lichém počtu pólových dvojic je i celkový počet cívkových svazků $3p$ lichý a není možné je rozdělit rovnoměrně do I a II polohy. Jeden svazek musí být přechodný (obr. 94), jeho čelo přechází z první polohy do druhé.



Obr. 93. Uspořádání čel soustředného vinití
a), b), c), d) u dvupolohového vinití, e), f) u třípolohového vinití



Obr. 94. Soustředné vinutí – pólpárové, dvoupolohové, s jedním přechodným svazkem: $2p = 6$, $q = 2$, $m = 3$, $Q = 36$

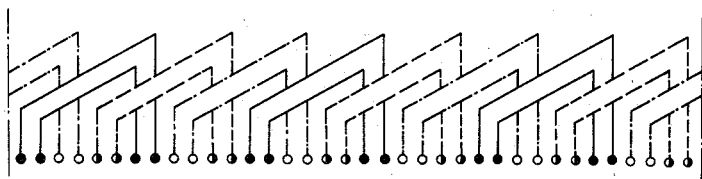
Nakreslené vinutí má $q = 2$, $m = 3$, $2p = 6$.

Počet drážek $Q = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 = 36$ drážek.

Ve schématu jsou nakresleny i spojky mezi cívkami jednoho svazku. Pro kontrolu zapojení jsou ve schématu vyznačeny směry indukovaných napětí.

Poloha přechodového svazku vyjde sama v průběhu kreslení.

Nesouměrnost vinutí při lichém p můžeme odstranit tak, že se všechny svazky zhotoví jako přechodové podle obr. 95.



Obr. 95. Soustředné vinutí z obr. 94, které má všechny svazky přechodné

b) Soustředné vinutí – pólové, trojpolohové

Nazývá se trojpolohové vinutí podle toho, že čela cívkových skupin vycházejí ve třech polohách (obr. 96).

V jedné fázi je $2p$ cívkových skupin, každá má $q/2$ cívek. Toto vinutí můžeme zhotovit bez přechodových svazků při jakémkoli počtu pólů.

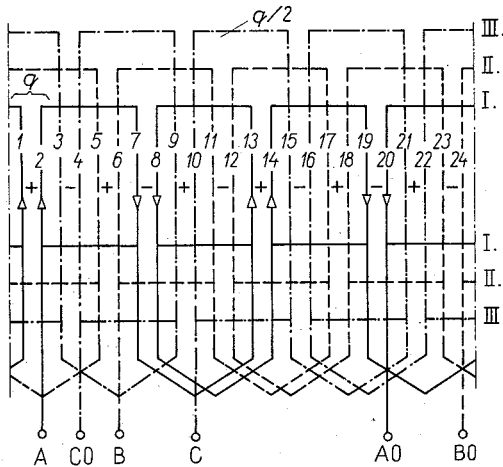
Skupinové spojky mohou být smyčkové nebo vlnové.

Pro lichá q vzniknou cívkové skupiny s nestejným počtem cívek. Například pro $q = 5$ se budou střídát skupiny po dvou a třech cívkách.

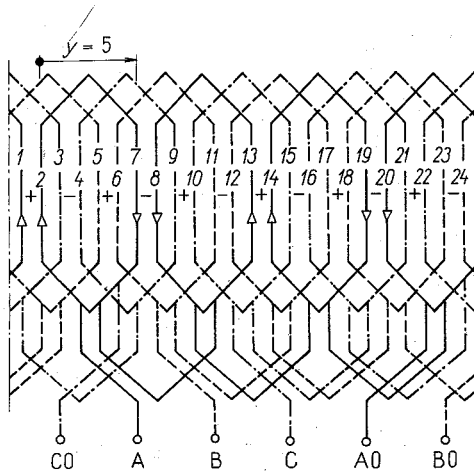
Uspořádání čel cívek ve třech polohách je na obr. 93e, f.

c) Rozložené vinutí se stejnými cívkami

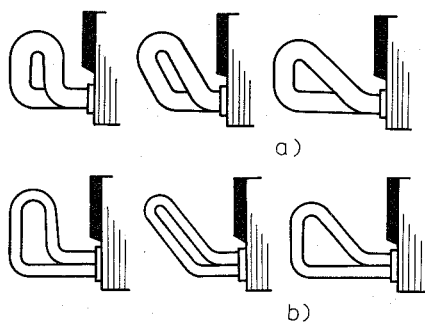
Toto vinutí vznikne rozstřiháním jednovrstvového jednoduchého stejnosměrného vinutí. Dnes se z jednovrstvových vinutí používá nejvíce.



Obr. 96. Soustředné vinutí –
pólové, třípolohové:
 $2p = 4, q = 2, m = 3, Q = 24$



Obr. 97. Jednovrstvové
vinutí se stejnými cívkami:
 $2p = 4, q = 2, m = 3, Q = 24$



Obr. 98. Úprava čel vinutí se stejnými cívkami
 a) čela jednovrstvového vinutí,
 b) čela dvouvrstvového vinutí

Všechny cívky mají stejný krok a jejich čela vycházejí z jedné drážky doprava a ze sousední drážky doleva, takže připomínají pletený koš (košíkové vinutí), obr. 97.

Aby takové střídání bylo možné, musí být cívkový krok lichý.

Všechna čela jsou po obvodu rovnoměrně rozložena bez ohledu na příslušnost k jednotlivým fázím, takže se musí důkladněji izolovat. Tvar čela je na obr. 98.

Protože zde cívky nevytvářejí skupiny, vinutí má větší počet spojek.

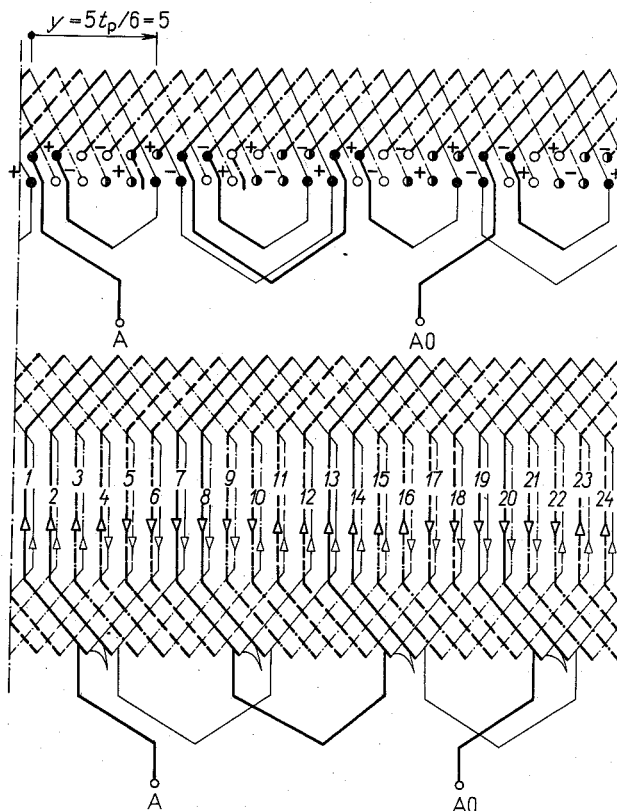
Aby bylo spojování cívek na stroji jednodušší a spojky byly co nejkratší, upraví se cívky už při výrobě vhodným způsobem.

3.3.4. Dvouvrstvová vinutí

U dvouvrstvových vinutí (obr. 99) jsou v každé drážce dvě cívkové strany. Počet všech cívek se rovná počtu drážek, je tedy dvakrát větší než u jednovrstvových vinutí. Protože jsou v některých drážkách uloženy cívkové strany různých fází, musí být navzájem důkladně izolovány na plně sdružené napětí.

Větší počet cívek a nutnost důkladnější izolace mezi čely zvětšují pracnost dvouvrstvového vinutí, ale magnetické pole vybuzené tímto vinutím má lepší průběh. Jeho průběh se více blíží sinusovce než průběh magnetického pole jednovrstvového vinutí (viz III. díl). Toho se dosáhne vhodným zkrácením kroku vinutí. Krok se zkracuje přibližně na $4/5$ pólové rozteče.

Další výhodou dvouvrstvového vinutí je, že při zkráceném kroku vycházejí kratší čela cívek, takže spotřeba mědi je menší. Kratšímu kroku odpovídá i menší vyložení čel, což umožňuje zkrátit celkovou délku stroje. Menší spotřebě mědi odpovídají i menší Jouleovy ztráty.



Obr. 99. Dvourstvé vinutí se stejnými cívkami:
 $2p = 4, q = 2, m = 3, Q = 24$

Na hotovém stroji poznáme dvourstvé vinutí podle toho, že na vnitřním obvodu jsou čela cívek formována jedním směrem, na vnějším obvodu opačně.

Poznámka. Vinutí, jehož cívky mají malý počet závitů z vodičů velkého průřezu, se nazývají tyčová vinutí.

3.3.5. Zlomková vinutí

Jsou to taková vinutí, u nichž je počet drážek na pól a fázi dán zlomkem. Takové vinutí vychází např. při dodatečném převíjení motoru pro jiné otáčky. Zvlášť jsou ale výhodná u velkých alternátorů, kde i při menším

počtu drážek dává toto vinutí napětí s průběhem velmi blízkým sinusovce.

Poznámka. Postup návrhu jednovrstvových, dvouvrstvových i zlomkových vinutí a způsob vyšetřování průběhu jimi vybuzeného magnetického pole jsou uvedeny ve III. dílu. Zapojení vinutí na svorkovnici je uvedeno v čl. 3.15.2.

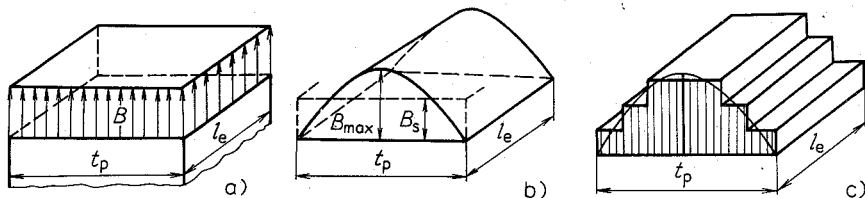
3.4. NAPĚTÍ INDUKOVANÉ VE VINUTÍ

Točivé magnetické pole buzené proudem v trojfázovém vinutí protíná jeho stojící vodiče synchronními otáčkami a indukuje v nich napětí. Při jeho výpočtu se vychází z magnetického toku jednoho pólu.

Kdyby magnetické pole pólu bylo homogenní se stálou magnetickou indukcí B (obr. 100), byl by jeho magnetický tok

$$\Phi = B t_p l_e \quad (161)$$

Veličina l_e udává tzv. efektivní délku železa. Rozumí se jí délka statorového svazku zmenšená o šířku ventilačních kanálů.



Obr. 100. Magnetický tok jednoho pólu

Skutečné magnetické pole buzené trojfázovým vinutím má zubový průběh, např. podle obr. 100c. Pro další výpočet se nahradí sinusovým polem první harmonické (obr. 100b).

Pro maximální magnetickou indukci je její střední hodnota

$$B_s = \frac{2}{\pi} B_{\max}$$

a magnetický tok první harmonické

$$\Phi = \frac{2}{\pi} B_{\max} t_p l_e \quad [\text{Wb}; \text{T}, \text{m}, \text{m}] \quad (162)$$

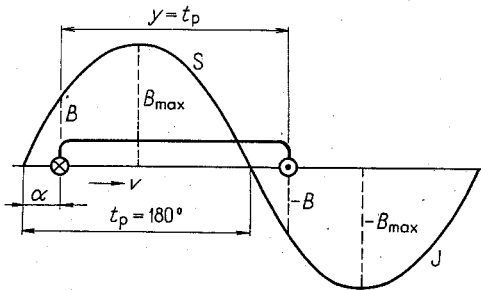
Jestliže zanedbáme pulsování magnetického pole, představuje tento výraz stálý magnetický tok, jehož velikost se s časem nemění a jehož fázor se po obvodu stroje otáčí synchronními otáčkami.

Podle obr. 101 je napětí indukované v jednom vodiči vinutí

$$U_{iv} = Bl_e v$$

kde B je magnetická indukce v místě pod vodičem,

v rychlost, kterou vodič protínají indukční čáry.



Obr. 101. Indukce napětí v jednom závitě

Pro sinusový průběh magnetické indukce první harmonické platí

$$B = B_{\max} \sin \alpha$$

Maximální magnetickou indukci můžeme vyjádřit z magnetického toku pólu (162)

$$B_{\max} = \frac{\pi \Phi}{2t_p l_e}$$

Rychlost v závisí na synchronních otáčkách a na průměru vrtání statoru d , na němž jsou vodiče umístěny

$$v = \frac{\pi d n_s}{60}$$

Obvod stroje πd můžeme vyjádřit pólovou roztečí $2pt_p$ a synchronní otáčky n_s rovnicí (153), takže dostaneme výraz

$$v = \frac{2pt_p 60f}{p60} = 2ft_p$$

a okamžitá hodnota indukovaného napětí je

$$u_{iv} = Bl_e v = B_{\max} l_e v \sin \alpha = \frac{\pi \Phi}{2t_p l_e} l_e 2ft_p \sin \alpha = \pi \Phi f \sin \alpha$$

Indukované napětí dosáhne maximální hodnoty pro $\alpha = \frac{\pi}{2}$, kdy je $\sin \alpha = 1$, takže jeho efektivní hodnota je

$$U_{iv} = \frac{1}{\sqrt{2}} \pi \Phi f = \frac{\sqrt{2}}{2} \pi \Phi f = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \Phi f$$

Jestliže má každá cívka vinutí N_c závitů, indukuje se v její jedné straně tzv. drážkové napětí

$$U_{id} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \Phi f N_c = 2,22 \Phi f N_c \quad (163)$$

U dvouvrstvého vinutí odpovídají každé drážce dvě drážková napětí.

Má-li jedna fáze N_s závitů spojených do série ($2N_s$ vodičů), bude indukované napětí v jedné fázi

$$U_i = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \Phi f 2N_s$$

a po úpravě dostaneme

$$U_i = \pi \sqrt{2} \Phi f N_s = 4,44 \Phi f N_s \quad [V; Wb, Hz] \quad (164)$$

Rovnice (164) platí jen za předpokladu, že všechny vodiče spojené do série se současně nacházejí ve stejném magnetickém poli. Tato podmínka by platila jen tehdy, jestliže by cívky měly plný krok, který by se přesně rovnal pólové rozteči, a jestliže by vodiče pod jedním pólem byly soustředěny do jedné drážky.

Ve skutečném vinutí jsou však vodiče rozloženy pod póly do q drážek a cívky nemají krok, který se přesně rovná pólové rozteči. Všechny vodiče jedné fáze nejsou tedy současně ve stejném magnetickém poli a indukované napětí v jednotlivých drážkách není stejné.

Výsledné napětí dané součtem všech drážkových napětí U_d je menší, než udává rovnice (164). Zmenšení skutečného napětí závisí na konstrukci

vinutí, na počtu drážek na pól a fázi a na zkrácení kroku. Vyjadřuje se činitelem vinutí k_v .

Činitel vinutí je potom definován poměrem geometrického a aritmetického součtu drážkových napětí

$$k_v = \frac{U_i}{\Sigma U_{id}} \quad (165)$$

Vychází vždy menší než jedna.

Skutečné indukované napětí je tedy

$$U_i = \pi \sqrt{2} \Phi f N_s k_v \quad [V; Wb, Hz] \quad (166)$$

Indukované napětí ve vinutí je střídavé a jeho kmitočet odpovídá otáčkám

$$f = \frac{pn_s}{60} \quad (167)$$

Maximální napětí se indukuje vždy v těch drážkách, nad kterými se právě nachází osa severního nebo jižního pólu točivého magnetického pole.

Indukované napětí, podobně jako ostatní veličiny, se označuje indexem 1 nebo 2, podle toho, zda jde o stator nebo rotor.

Zanedbáme-li vnitřní úbytky napětí, musí být síťové napětí, na které je vinutí připojeno, stejně velké jako indukované napětí U_i

$$U = \pi \sqrt{2} \Phi f N_s k_v \quad [V; Wb, Hz] \quad (168)$$

Činitele vinutí můžeme pro jednotlivé druhy vinutí určit různými způsoby, uvedenými ve III. dílu.

3.5. MAGNETICKÝ OBVOD

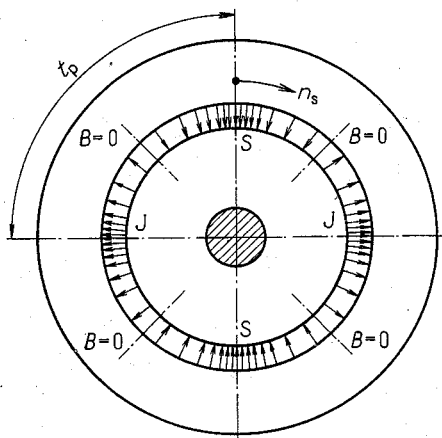
Kdyby stator i rotor indukčního motoru měly úplně hladký povrch a kdyby vodiče byly rozloženy po povrchu spojitě, byly by indukční čáry ve vzduchové mezeře rozloženy přesně podle sinusovky a otáčely by se v ní synchronními otáčkami (obr. 102).

Rozložení indukčních čar pro dvě pólové rozteče pro drážkované železo je vyznačeno na obr. 103.

Střední indukční čára prochází postupně vzduchovou mezerou pod severním pólem, zuby rotoru, jhem rotoru, zuby rotoru, opět vzduchovou mezerou pod jižním pólem, zuby statoru, jhem statoru a konečně se

uzavře opět zuby statoru. Předpokládáme, že všechny indukční čáry procházejí jen zuby; drážkami, které mají značně větší magnetický odpor, neprocházejí.

Abychom mohli určit magnetizační proud potřebný pro vybuzení žádaného magnetického toku, musíme vypočítat magnetomotorické napětí pro jednu pólovou dvojici F_m (tzv. buzení). Postup výpočtu je uveden ve třetím díle této učebnice.



Obr. 102. Ideální rozložení magnetického toku ve vzduchové mezeře indukčního stroje

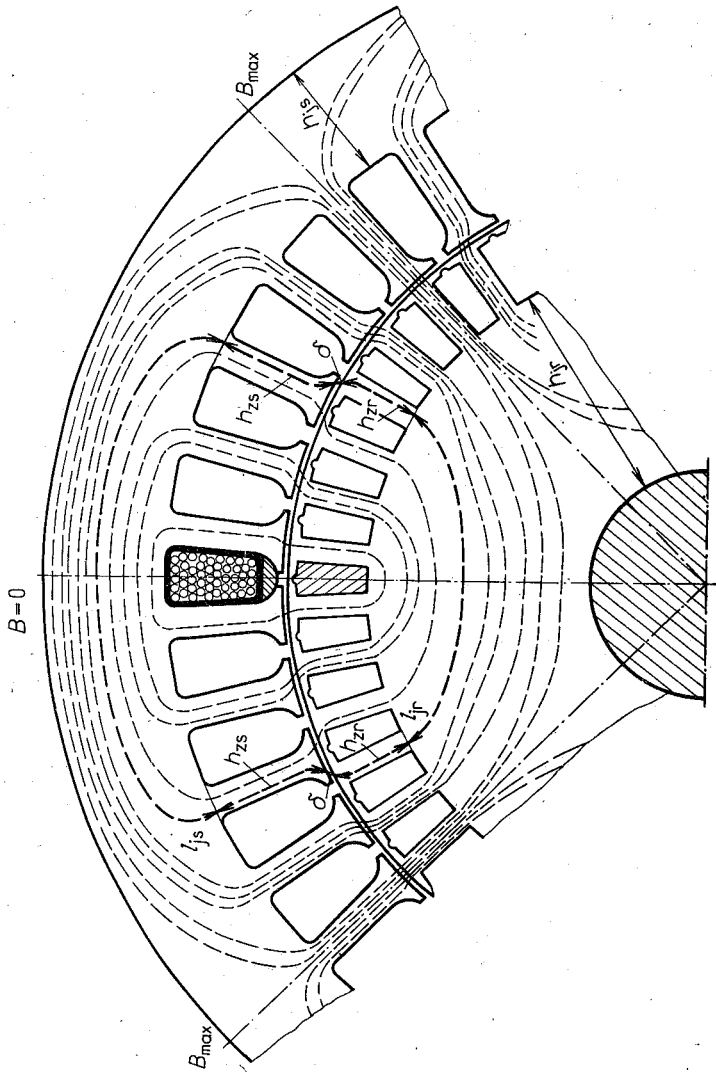
3.6. MAGNETIZAČNÍ PROUD

K tomu, aby magnetickým obvodem daného stroje procházel magnetický tok s požadovanou indukcí B ve vzduchové mezeře, je zapotřebí v každé fázi určitého magnetizačního proudu I_μ , který vytvoří celkové magnetomotorické napětí dané součtem magnetických napětí.

Magnetomotorické napětí jedné cívky umístěné na statoru podle obr. 104 má na úseku, který odpovídá kroku cívky, všude stejnou velikost danou součinem

$$F = IN$$

a jeho průběh můžeme zobrazit obdélníkem (obr. 104a). To znamená, že při stejné vzduchové mezeře a při nevelké magnetické indukci v železe bude v každém místě vzduchové mezery stejná magnetická indukce.

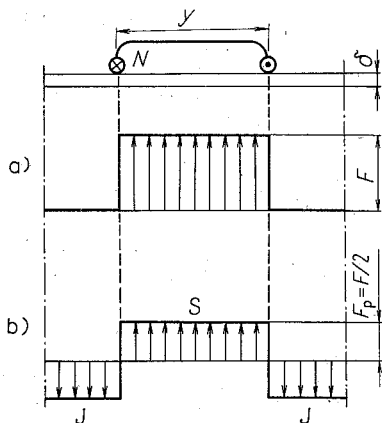


Obr. 103. Magnetický obvod indukčního stroje

Magnetomotorické napětí NI vyvozuje magnetický tok v celém dvojpóli stroje. Pro lepší názornost se rozděluje na dvě části

$$F_p = \frac{1}{2} F$$

které představují magnetomotorická napětí zvlášť pro severní a zvlášť pro jižní pól (obr. 104b).



Obr. 104. Magnetomotorické napětí jedné cívky

Prochází-li cívkou efektivní střídavý proud I , je okamžitá hodnota magnetomotorického napětí v každém okamžiku jiná. Jeho amplituda odpovídá maximální hodnotě proudu a je dána vztahem

$$F = \sqrt{2} IN$$

nebo pro jeden pól

$$F_p = \frac{\sqrt{2}}{2} IN$$

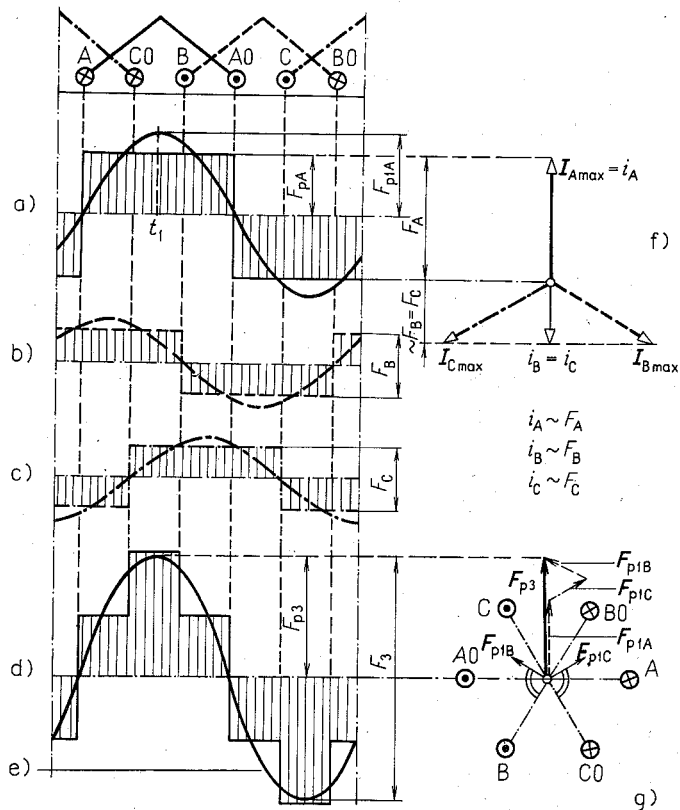
U trojfázového vinutí (obr. 105) se na výsledném magnetomotorickém napětí podílejí všechny tři fáze. Jedna fáze, mající N_{s1} závitů zapojených do série, kterými prochází proud I_μ , vytvoří na jeden pól magnetomotorické napětí o amplitudě

$$F_p = \sqrt{2} I_\mu \frac{N_{s1}}{2p} k_{v1} \quad (169)$$

kde $N_{s1}/(2p)$ je počet závitů na jeden pól,

k_{v1} činitel vinutí, udávající vliv rozložení vinutí a zkrácení kroku na velikost magnetomotorického napětí.

Okamžité hodnoty magnetomotorických napětí všech tří fází jsou v každém okamžiku jiné a odpovídají okamžitým hodnotám proudů. Na obr. 105b jsou nakresleny zvlášť pro okamžik t_1 , v němž má fáze A proud a tím magnetomotorické napětí právě maximální a kladné.



Obr. 105. Určení magnetizačního proudu trojfázového vinutí

Výsledné magnetomotorické napětí je dáno součtem okamžitých hodnot a má po obvodu obvyklý zubovitý průběh (obr. 105d). Aby se dalo určit výpočtem, nahradí se obdélníkový průběh magnetomotorického na-

pětí jednotlivých cívek jejich první harmonickou s amplitudou

$$F_{p1} = \frac{4}{\pi} F_p = \frac{4}{\pi} \sqrt{2} I_\mu \frac{N_{s1}}{2p} k_{v1} \quad (170)$$

Fázory můžeme nahradit jen sinusové průběhy.

Výslednou první harmonickou magnetomotorického napětí všech fází můžeme určit sečtením okamžitých hodnot vyznačených sinusovek (obr. 105e) nebo geometrickým součtem podle obr. 105g.

Ve vyznačeném okamžiku je výsledné magnetomotorické napětí dáno součtem

$$F_{p3} = F_{p1A} + F_{p1B} + F_{p1C} = F_{p1A} + \frac{1}{2} F_{p1A} + \frac{1}{2} F_{p1A}$$

a svírají-li všechny fázory úhel 60° , je číselně

$$F_{p3} = F_{p1A} + \frac{1}{2} F_{p1A} = \frac{3}{2} F_{p1A}$$

Opakováním stejného postupu pro několik okamžiků se dá dokázat, že stejný výsledek platí vždy, takže amplituda výsledného magnetomotorického napětí všech tří fází je dána vztahem

$$F_{p3} = \frac{3}{2} F_{p1} \quad (171)$$

nebo obecně pro vinutí s m_1 fázemi

$$F_{pm} = \frac{m_1}{2} F_{p1} \quad (172)$$

Pro dvojici pólů je amplituda dvojnásobná

$$F_m = 2F_{pm} = 2 \frac{m_1}{2} F_{p1} = 2 \frac{m_1}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \sqrt{2} I_\mu \frac{N_{s1}}{2p} k_{v1}$$

a po úpravě dostaneme

$$F_m = 0,9m_1 I_\mu \frac{N_{s1}}{p} k_{v1} \quad (173)$$

Tato velikost magnetomotorického napětí se musí rovnat magnetomotorickému napětí F , potřebnému k vyvolání magnetického toku ve dvojici

pólů, tedy

$$F = 0,9m_1 I_\mu \frac{N_{s1}}{p} k_{v1}$$

a z tohoto vztahu vypočítáme magnetizační proud

$$I_\mu = \frac{pF}{0,9m_1 N_{s1} k_{v1}} \quad (174)$$

nebo pro $m_1 = 3$

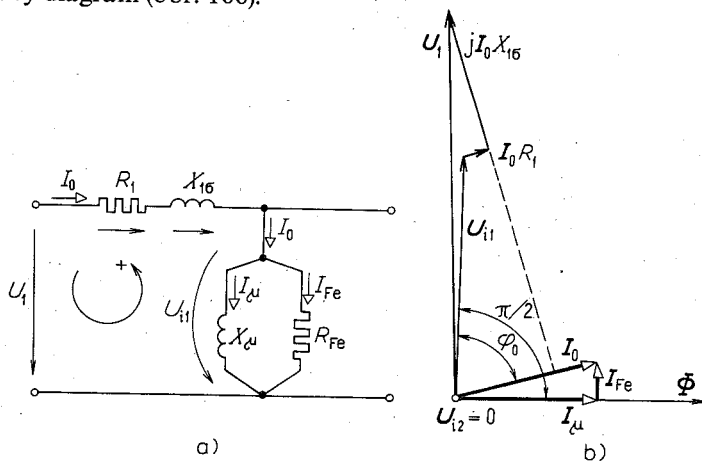
$$I_\mu = \frac{pF}{2,7N_{s1} k_{v1}} \quad (175)$$

3.7. CHOD NAPRÁZDNO

3.7.1. Náhradní schéma a fázorový diagram

Při chodu naprázdno je motor bez mechanického zatížení a jeho rotor se otáčí synchronními otáčkami. V rotorových vodičích se neindukuje žádné napětí, a neprochází jimi tedy proud. Točivý moment motorů je nulový.

Elektricky se indukční motor chová při chodu naprázdno stejně jako transformátor. Stejně je i jeho náhradní schéma a jemu odpovídající fázorový diagram (obr. 106).



Obr. 106. Indukční motor naprázdno

Magnetický tok Φ závisí na svorkovém napětí a je podle rovnice (168)

$$\Phi = \frac{U_1}{\pi \sqrt{2} f N_{s1} k_{v1}} \quad (176)$$

Proud naprázdno je dán součtem

$$I_0 = I_\mu + I_{Fe} \quad (177)$$

kde I_μ je magnetizační proud,

I_{Fe} ztrátový proud.

Ztrátový proud je potřebný ke krytí ztrát naprázdno ΔP_0 a je dán výrazem

$$I_{Fe} = \frac{\Delta P_0}{3U_1} = \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_m}{3U_1} \quad [A; W, V] \quad (178)$$

kde ΔP_{Fe} jsou ztráty v železe,

ΔP_m ztráty mechanické (tření v ložiskách a tření rotoru o vzduch).

K protlačení proudu naprázdno činným odporem a rozptylovou reaktancí statorového vinutí jsou potřebné úbytky napětí, dané podobně jako u transformátoru II. Kirchhoffovým zákonem (obr. 106a)

$$U_1 - I_0 R_1 - j I_0 X_{1\sigma} - U_{11} = 0$$

z něhož vychází potřebné svorkové napětí

$$U_1 = U_{11} + I_0 R_1 + j I_0 X_{1\sigma} \quad (179)$$

Při chodu naprázdno je rotorový proud $I_2 = 0$.

Ve srovnání s transformátorem je proud naprázdno u indukčních motorů větší, protože magnetický tok prochází dvěma vzduchovými mezerami, které mají velký magnetický odpor.

Proud naprázdno závisí na velikosti motoru a na počtu pólů. Tvoří obvykle asi 20 až 40 % jmenovitého proudu motoru (u transformátoru je asi 5 až 10 %).

Ztrátový proud indukčních motorů je velmi malý, takže fázový posun φ_0 je téměř 90° ($\cos \varphi_0$ bývá 0,05 až 0,15). Z fázového diagramu na obr. 106 je vidět, že velké indukční motory mohou při chodu naprázdno svým proudem velmi značně zhoršovat celkový účinník odběru závodu, a proto se má chod naprázdno omezovat.

3.7.2. Ztráty v železe

U indukčního motoru musíme počítat s těmito ztrátami v železe

- a) hysterézní ztráty v železe statoru,
- b) ztráty vířivými proudy v železe statoru,
- c) ztráty způsobené natáčením elementárních magnetů do směru točivého magnetického pole,
- d) povrchové ztráty ve statoru, způsobené vířivými proudy vyvolanými změnou magnetické indukce pod zubem a pod otevřením drážky,
- e) povrchové ztráty v rotoru,
- f) pulsační ztráty v zubech statoru, vyvolané neustálou změnou vzájemné polohy zubů statoru a rotoru.

Ztráty v železe rotoru můžeme za normálního chodu zanedbat, neboť kmitočet v rotoru, závislý na skluzu, je velmi malý.

Ztráty v železe rotoru je třeba respektovat jen u strojů s dlouhým rozběhem, během něhož je kmitočet v rotoru blízký síťovému kmitočtu.

Povrchové a pulsační ztráty se počítají zvlášť jen u strojů s větším výkonem.

Hysterézní ztráty a ztráty vířivými proudy se počítají zvlášť pro zuby statoru a zvlášť pro jeho jho, přičemž se vliv přemagnetování točivým magnetickým polem a vliv opracování plechů vyjádří konstantami, určenými měřeními na hotových strojích.

Rovnice pro výpočet ztrát v železe je uvedena ve třetím dílu učebnice.

Protože magnetický tok závisí jen na napětí, jsou i ztráty v železe pro každé zatížení stejné a rovnají se ztrátám v železe při chodu naprázdno!

3.8. INDUKČNÍ MOTOR PŘI ZATÍŽENÍ

3.8.1. Náhradní schéma a fázorový diagram

Připojíme-li statorové vinutí na síťové napětí U_1 s kmitočtem f_1 , vznikne točivé magnetické pole, jehož indukční čáry protínají vodiče rotorového vinutí. Při rozpojeném rotorovém vinutí rotor stojí a jeho vodiče jsou protínány točivým magnetickým polem synchronními otáčkami. Indukuje se v nich přitom napětí se síťovým kmitočtem f_1

$$U_{i20} = \pi \sqrt{2} \Phi f_1 N_s k_{v2} \quad (180)$$

a indukční motor se chová jako transformátor naprázdno s převodem

$$\frac{U_{i1}}{U_{i20}} = \frac{\pi\sqrt{2}\Phi f_1 N_{s1} k_{v1}}{\pi\sqrt{2}\Phi f_1 N_{s2} k_{v2}} = \frac{N_{s1} k_{v1}}{N_{s2} k_{v2}} \quad (181)$$

Uzavře-li se u nezátíženého ideálního motoru rotorové vinutí, roztočí se rotor synchronními otáčkami a v rotorových vodičích se neindukuje žádné napětí, neprochází jimi tedy proud a moment motoru je nulový.

Po zatížení motoru vnějším momentem začne rotor zaostávat za točivým magnetickým polem, v jeho vinutí se indukuje napětí potřebné k průchodu proudu I_2 odporem rotorového vinutí. Čím větším momentem rotor zatěžujeme, tím víc se zpožďuje za točivým magnetickým polem. Poměr rozdílu synchronních a skutečných otáček k synchronním otáčkám je tzv. *skluz*, a je dán vztahem

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (182)$$

Rotorový proud I_2 a rotorové indukované napětí U_{i2} mají kmitočet úměrný rozdílu otáček

$$f_2 = \frac{p(n_s - n)}{60} = \frac{p(n_s - n)}{60} \cdot \frac{n_s}{n_s}$$

$$f_2 = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot \frac{pn_s}{60} = sf_1 \quad (183)$$

takže rotorové napětí má velikost

$$U_{i2} = \pi\sqrt{2}\Phi f_2 N_{s2} k_{v2} = \pi\sqrt{2}\Phi s f_1 N_{s2} k_{v2} \quad (184)$$

Porovnáním s rovnicí (180) vychází

$$U_{i2} = sU_{i20} \quad (185)$$

Z rovnice (185) je vidět, že napětí U_{i2} je tím větší, čím je větší skluz. Pro stojící rotor je $n = 0$, $s = 1$ a napětí U_{i2} je největší a rovná se napětí U_{i20} . Při chodu naprázdno je $n = n_s$, $s = 0$ a rotorové napětí je nulové.

Za normálního chodu motoru je rotorový kmitočet velmi malý, např. při 4% skluzu je jen $0,04 \cdot 50 = 2$ Hz.

Určitému rotorovému proudu I_2 odpovídá podobně jako u (transformátoru) určitý proud I_1 , který je dán známým vztahem (obr. 107)

$$I_1 = -I_{21} + I_0 = -I_{21} + I_\mu + I_{Fe} \quad (186)$$

U indukčního motoru (stejně jako u transformátoru) je třeba respektovat rozptyl magnetického toku. Část magnetického toku Φ_1 se uzavírá rozptylovými cestami kolem statorového vinutí a část magnetického toku Φ_2 rozptylovými cestami kolem rotorového vinutí, takže výsledný magnetický tok ve vzduchové mezeře je menší než vychází z rovnice (176).

Rozptylové toky se zvětšují s rostoucím zatížením, neboť jsou buzeny proudy I_1 a I_2 , které se se zatížením také mění. Je tedy skutečný magnetický tok Φ ve vzduchové mezeře při každém zatížení jiný a při každém zatížení se indukuje ve vinutí jiné napětí.

Pro výhodnější matematické vyjádření zavedeme i u indukčního motoru předpoklad stálého magnetického toku Φ a jemu odpovídajícího stálého indukovaného napětí, ale vliv rozptylových toků nahradíme rozptylovými reaktancemi $X_{1\sigma}$ a $X_{2\sigma}$ a úbytky, které v nich vyvolávají proudy I_1 a I_2 .

Rozptylová reaktance statorového vinutí je stálá, neboť odpovídá stálému síťovému kmitočtu f_1

$$X_{1\sigma} = 2\pi f_1 L_1 \quad (187)$$

Rozptylová reaktance rotorového vinutí je proměnná, neboť závisí na proměnném kmitočtu f_2 . Pro skluz s je tato reaktance

$$X_{2\sigma s} = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi s f_1 L_2 = s X_{2\sigma} \quad (188)$$

kde

$$X_{2\sigma} = 2\pi f_1 L_2$$

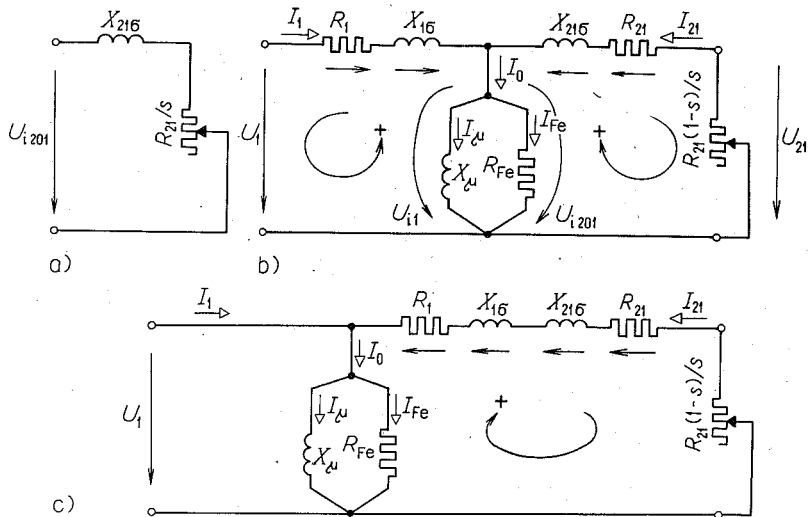
je reaktance rotorového vinutí, jestliže rotor stojí ($s = 1$).

Rotorový proud je podle Ohmova zákona

$$I_2 = \frac{U_{i2}}{R_2 + jX_{2\sigma s}} = \frac{U_{i2}}{R_2 + jsX_{2\sigma}} = \frac{sU_{i20}}{R_2 + jsX_{2\sigma}}$$

Vydělíme-li čítec i jmenovatel skluzem, dostaneme

$$I_2 = \frac{U_{i20}}{\frac{R_2}{s} + jX_{2\sigma}} \quad (189)$$



Obr. 107. Náhradní schéma indukčního motoru
 a) rotorový obvod, b) přesné náhradní schéma, c) zjednodušené náhradní schéma

Z rovnice (189) je vidět, že rotorový obvod zatíženého motoru můžeme nahradit obvodem se stálou reaktancí $X_{2\sigma}$ a proměnným odporem R_2/s (obr. 107a).

Ten můžeme rozdělit na dvě složky

- a) stálý odpor rotorového vinutí R_2 ,
- b) zbytek

$$\frac{R_2}{s} - R_2 = \frac{R_2}{s} - R_2 \frac{s}{s} = \frac{R_2}{s} (1 - s)$$

podle obr. 107b.

Platí tedy

$$\frac{R_2}{s} = R_2 + \frac{R_2}{s} (1 - s) \quad (190)$$

Náhradní schéma zatíženého motoru se kreslí se všemi rotorovými veličinami přepočtenými na stator. Platí vztahy

$$I_{21} = I_2 \frac{m_2 N_{s2} k_{v2}}{m_1 N_{s1} k_{v1}} \quad (191)$$

$$U_{i201} = U_{i20} \frac{m_1 N_{s1} k_{v1}}{m_2 N_{s2} k_{v2}} \quad (192)$$

$$R_{21} = R_2 \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{N_{s1} k_{v1}}{N_{s2} k_{v2}} \right)^2 \quad (193)$$

$$X_{21\sigma} = X_{2\sigma} \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{N_{s1} k_{v1}}{N_{s2} k_{v2}} \right)^2 \quad (194)$$

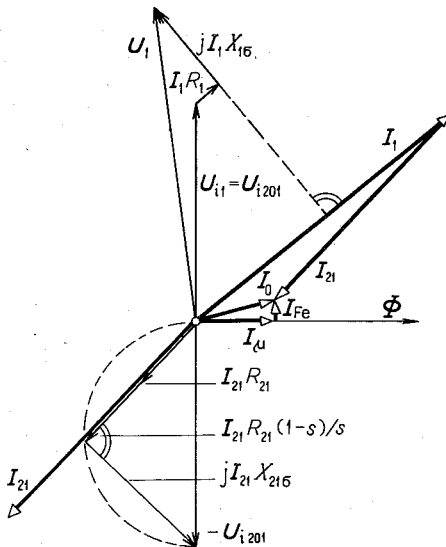
Odvození vztahu (193) a tím i vztahu (194) je uvedeno v článku 3.10. Magnetizačnímu proudu odpovídá *magnetizační reaktance*

$$X_\mu = \frac{U_{i1}}{I_\mu} \quad (195)$$

a ztrátovému proudu odpovídá fiktivní odpor

$$R_{Fe} = \frac{U_{i1}}{I_{Fe}} = \frac{\Delta P_{Fe}}{I_{Fe}^2} \quad (196)$$

Indukované napětí U_{i201} je stejně velké jako U_{i1} , neboť podle dohody odpovídá stejnému magnetickému toku Φ .



Obr. 108. Fázorový diagram indukčního motoru podle přesného náhradního schématu na obr. 107b

Úplné náhradní schéma je na obr. 107b.

Proměnný odpor

$$\frac{R_2}{s} (1 - s)$$

představuje zátěž sekundárního obvodu a odpovídá mechanickému výkonu motoru.

Náhradnímu schématu z obr. 107b odpovídá fázorový diagram podle obr. 108, který respektuje podmínky Kirchhoffových zákonů

$$I_1 + I_{21} = I_0 = I_\mu + I_{Fe} \quad (197)$$

pro stator

$$U_1 = U_{11} + I_1 R_1 + j I_1 X_{1\sigma} \quad (198)$$

a pro rotor

$$-U_{i201} = I_{21} R_{21} + I_{21} \frac{R_{21}}{s} (1 - s) + j I_{21} X_{21\sigma} \quad (199)$$

Rotorové úbytky napětí tvoří pravoúhlý trojúhelník nad fázorem $-U_{i201}$, který se o 90° zpožďuje za magnetickým tokem Φ .

Za předpokladu stálého magnetického toku je napětí U_{i201} stále a při změně zatížení (skluzu) se bude vrchol pravoúhlého trojúhelníka posouvat po kružnici nad průměrem U_{i201} .

3.8.2. Zjednodušené náhradní schéma

Aby bylo vyčíslování proudů, výkonů i momentů zjednodušeno, upraví se náhradní schéma indukčního motoru podle obr. 107c. Zjednodušenému náhradnímu schématu odpovídá fázorový diagram podle obr. 109.

Rotorový proud podle zjednodušeného schématu je

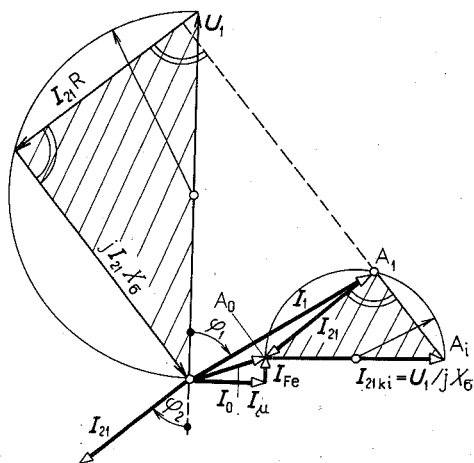
$$I_{21} = \frac{U_1}{Z} \quad (200)$$

kde impedance náhradního obvodu je

$$Z = \left(R_1 + \frac{R_{21}}{s} \right) + j(X_{1\sigma} + X_{21\sigma}) \quad (201)$$

nebo po dosazení za R_{21}/s z rovnice (190)

$$\mathbf{Z} = \left[R_1 + R_{21} + \frac{R_{21}}{s} (1 - s) \right] + j(X_{1\sigma} + X_{21\sigma}) \quad (202)$$



Obr. 109. Fázorový diagram podle zjednodušeného náhradního schématu na obr. 107c

Motor odebírá ze sítě příkon

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (203)$$

Jeho část hraří ztráty ve statorovém vinutí

$$\Delta P_{j1} = m_1 R_1 I_1^2 \quad (204)$$

a ztráty naprázdno

$$\Delta P_0 = \Delta P_{Fe} + \Delta P_m$$

Zbytek představuje výkon točivého magnetického pole ve vzduchové mezeře, který odpovídá činnému výkonu rotorového obvodu z náhradního schématu

$$P_\delta = m_1 \frac{R_{21}}{s} I_{21}^2 \quad (205)$$

Ten se rozkládá na dvě složky

a) ztráty v rotorovém vinutí

$$\Delta P_{j2} = m_1 R_{21} I_{21}^2 \quad (206)$$

b) mechanický výkon na hřídeli – činný výkon rotorového proudu v proměnném odporu $R_{21}(1 - s)/s$

$$P = P_{\delta} - \Delta P_{j2} = m_1 \frac{R_{21}}{s} (1 - s) I_{21}^2 \quad (207)$$

Porovnáním rovnic (205), (206) a (207) vychází

$$\frac{\Delta P_{j2}}{P_{\delta}} = \frac{m_1 R_{21} I_{21}^2}{m_1 \frac{R_{21}}{s} I_{21}^2} = s \quad (208)$$

$$\frac{P}{P_{\delta}} = \frac{m_1 \frac{R_{21}}{s} (1 - s) I_{21}^2}{m_1 \frac{R_{21}}{s} I_{21}^2} = (1 - s) \quad (209)$$

a z toho platí

$$\Delta P_{j2} = s P_{\delta} \quad (210)$$

a také

$$P = (1 - s) P_{\delta} \quad (211)$$

To znamená, že výkon točivého magnetického pole se rozděluje na rotorové ztráty a výkon na hřídeli při různém skluzu v jiném poměru.

Z rovnice (208) můžeme skluz definovat jako poměr ztrát v rotoru k výkonu točivého magnetického pole.

Naopak platí:

Skluz je úměrný ztrátám v rotoru a tedy i rotorovému odporu.

Čím větší odpor má rotorové vinutí, tím větší skluz má motor.

3.8.3. Moment indukčního motoru

Mechanickému výkonu na hřídeli odpovídá točivý moment

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{\frac{2\pi n}{60}} = 9,55 \frac{P}{n} \quad [\text{Nm}; \text{W}, \text{min}^{-1}] \quad (212)$$

kde n jsou otáčky rotoru, zmenšené o skluz vzhledem k synchronním otáčkám

$$n = n_s(1 - s)$$

takže

$$M = 9,55 \frac{P}{n_s(1 - s)}$$

z toho pak porovnáním s rovnicí (211) vychází

$$M = 9,55 \frac{P_\delta}{n_s} \quad [\text{Nm}; \text{W}, \text{min}^{-1}] \quad (213)$$

Je vidět, že moment je úměrný výkonu točivého magnetického pole ve vzduchové mezeře při synchronních otáčkách, tzn. že platí také

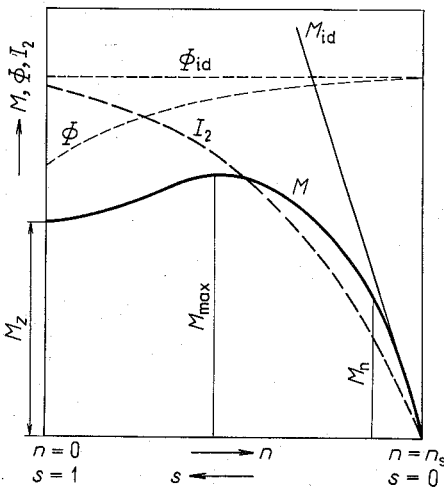
$$M = 9,55 \frac{P + \Delta P_{j2}}{n_s} \quad (214)$$

nebo podle rovnice (205)

$$M = 9,55 \frac{m_1 R_{21} I_{21}^2}{s n_s} \quad (215)$$

Pro posouzení vlastností motoru je důležitá *momentová charakteristika*, která udává závislost momentu na skluzu nebo otáčkách.

Pro konstantní poloměr rotoru je moment závislý na obvodové tažné síle, která podle vztahu $F = B I l$ závisí u indukčního motoru na rotorovém proudu I_2 a magnetické indukci B , která je přímo úměrná magnetickému



Obr. 110. Momentová charakteristika indukčního motoru

toku Φ . Platí tedy

$$M \sim \Phi I_2 \quad (216)$$

Kdybychom zanedbali rozptyl okolo vinutí, byl by magnetický tok stálý a rotorový proud by byl přímo úměrný skluzu. Potom by byl průběh momentu dán přímkou (M_{id} v obr. 110).

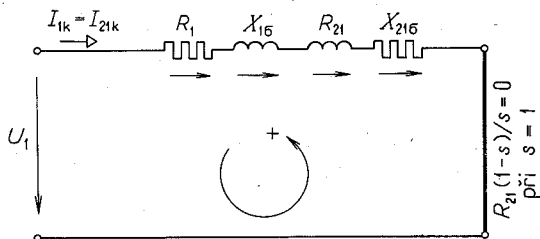
Ve skutečnosti se však magnetický tok i proud rotoru s rostoucím zatížením (skluzem) zmenšují, takže skutečný moment M má průběh podle obr. 110. Pokud rotor stojí ($s = 1$), je jeho tzv. *záběrný moment* M_z . Maximální hodnoty (tzv. *moment zvratu*) M_{max} dosahuje při takovém skluzu, při kterém je součin ΦI_2 největší.

Podrobněji o momentové charakteristice pojednává článek 3.14.1.

3.9. CHOD NAKRÁTKO

3.9.1. Náhradní schéma, proud nakrátko

Indukční motor pracuje nakrátko, jestliže jeho rotor stojí ($n = 0, s = 1$), tedy při rozběhu, v okamžiku připojení na síť nebo při zastavení způsobeném přetížením. Rotorové vodiče jsou točivým magnetickým polem protínány synchronními otáčkami a indukuje se v nich velký zkratový proud se síťovým kmitočtem f_1 .



Obr. 111. Náhradní schéma indukčního motoru pro chod nakrátko

Velikost ustáleného proudu nakrátko při chodu nakrátko můžeme určit ze zjednodušeného náhradního schématu (obr. 111), ve kterém vynecháme reaktanci X_μ a odpor R_{Fe} , neboť proud I_0 je vzhledem k proudu nakrátko zanedbatelně malý. Náhradní zatěžovací odpor

$$\frac{R_{21}}{s} (1 - s)$$

je pro $s = 1$ roven nule, takže zkratový proud je omezen impedancí vinutí

$$I_{1k} = \frac{U_1}{Z} \quad (217)$$

kde

$$Z = (R_1 + R_{21}) + j(X_{1\sigma} + X_{21\sigma}) \quad (218)$$

nebo číselně

$$Z = \sqrt{(R_1 + R_{21})^2 + (X_{1\sigma} + X_{21\sigma})^2} \quad (219)$$

Pro indukční motor je vodivost rozptylových cest při porovnání s vodivostí hlavního magnetického obvodu se vzduchovou mezerou větší než u transformátoru, takže jeho reaktance je větší a zkratový proud menší. Průměrně je

$$I_{1k} = (3,5 \text{ až } 7) I_1$$

zatímco u transformátoru byl

$$I_{1k} = (20 \text{ až } 25) I_1$$

Napětí indukované při chodu nakrátko v rotorovém vinutí je velmi malé, neboť při nulovém zatěžovacím odporu prochází proud jen nepatrným odporem rotorového vinutí. Na jeho indukování stačí jen malý magnetický tok Φ_2 , takže při chodu nakrátko se téměř celý statorový magnetický tok Φ_1 rozdělí na rozptylové toky

$$\Phi_1 = \Phi_{1\sigma} + \Phi_{2\sigma} \quad (220)$$

Můžeme tedy reaktanci vinutí určit z chodu nakrátko výpočtem nebo nepřímým měřením. Stejně tak můžeme z chodu nakrátko určit výpočtem nebo měřením i činný odpor obou vinutí.

Při chodu nakrátko má motor určitý *záběrný moment* M_z , který je podmínkou pro samočinný rozběh motoru. Jeho velikost můžeme určit výpočtem z rovnice (215), jestliže do ní dosadíme $s = 1$ a $I_{21} = I_{21k} = I_{1k}$

$$M_z = 9,55 \frac{m_1 R_{21} I_{1k}^2}{n_s} \quad (221)$$

Výhodnější však je stanovit záběrný moment z kruhového diagramu. Důležitým údajem o motoru je poměr záběrného momentu k momentu jmenovitému, ze kterého je možné soudit na vhodnost motoru pro dané

poměry. O jeho velikosti rozhodují ztráty v rotoru, a tedy i velikost rotorového odporu.

Jestliže zanedbáme rozdíl otáček (n) proti synchronním otáčkám (n_s), je jmenovitý moment podle rovnice (212) přibližně

$$M_n \doteq 9,55 \frac{P}{n_s}$$

takže ve srovnání s rovnicí (221) je

$$\frac{M_z}{M_n} = \frac{m_2 R_{21} I_{1k}^2}{P} \quad (222)$$

Z tohoto vztahu můžeme určit při návrhu odpor jeho rotorového vinutí, má-li motor dosáhnout předepsaný poměr M_z/M_n (viz III. díl učebnice).

3.9.2. Měření nakrátko

Rotor se zabrzdí a stator se připojí ke sníženému napětí U'_{1k} , které vyvolá ve statorovém vinutí proud I'_{1k} , přibližně se rovnající jmenovitému proudu motoru. Impedance motoru je potom

$$Z = \frac{U'_{1k}}{I'_k} \quad (223)$$

Zároveň se wattmetrem měří výkon odebíraný zabrzděným motorem P'_k . Z něho se určí účinník při chodu nakrátko

$$\cos \varphi_k = \frac{P'_k}{m_1 U'_{1k} I'_k} \quad (224)$$

a složky impedance

$$R = Z \cos \varphi_k \quad (225)$$

$$X_\sigma = Z \sin \varphi_k = Z \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_k} \quad (226)$$

Představuje-li výkon P'_k ztráty, můžeme odpor vyjádřit přímo vztahem

$$R = \frac{P'_k}{m_1 I_{1k}^2} \quad (227)$$

Ze známé impedance Z můžeme potom určit skutečný proud na-
krátko

$$I_{1k} = \frac{U_1}{Z} \quad (228)$$

3.10. ODPOR VINUTÍ

Odpor jedné fáze statorového vinutí je

$$R_1 = \varrho \frac{(l + l_{\varepsilon 1}) 2N_{s1}}{2aS_1} (1 + k) \quad (229)$$

kde ϱ je měrný odpor materiálu vinutí,

l délka železa,

$l_{\varepsilon 1}$ délka čela,

N_{s1} počet závitů zapojených do série,

S_1 průřez vodičů,

$2a$ počet případných paralelních větví vinutí.

Výraz $(1 + k)$ představuje *činitele dodatečných ztrát*, kterým se vyjadřuje zvětšení ztrát fiktivním zvětšením odporu masivních vodičů vlivem rozptylového magnetického toku.

Dodatečné ztráty můžeme zmenšit rozdělením vodiče na paralelní větve od sebe izolované. Vodič se musí rozdělit v kolmém směru na indukční čáry rozptylového magnetického toku. Rozdělením vodiče ve směru jeho šířky se ztráty nezmenší.

Odpor jedné fáze rotorového vinutí je podobně

$$R_2 = \varrho \frac{(l + l_{\varepsilon 2}) 2N_{s2}}{2aS_2} \quad (230)$$

Dodatečné ztráty v rotoru není třeba uvažovat, neboť rotorový kmitočet je nízký.

Rotorový odpor se přepočte na stator z podmínky rovnosti ztrát

$$m_1 R_{21} I_{21}^2 = m_2 R_2 I_2^2$$

$$R_{21} = R_2 \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{I_2}{I_{21}} \right)^2$$

Dosadíme-li za I_{21} z rovnice (191), dostaneme

$$R_{21} = R_2 \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{I_2}{I_2 \frac{m_2 N_{s2} k_{v2}}{m_1 N_{s1} k_{v1}}} \right)^2$$

a po úpravě

$$R_{21} = R_2 \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{N_{s1} k_{v1}}{N_{s2} k_{v2}} \right)^2 \quad (231)$$

Odpor jedné fáze klece můžeme určit jen nepřímo z Joulových ztrát.

Jak bude dokázáno ve III. díle učebnice, představuje klec mnoho-fázové vinutí s počtem fází

$$m_2 = \frac{Q_2}{p} \quad (232)$$

a s počtem závitů spojených do série

$$N_{s2} = \frac{1}{2} \quad (233)$$

Rotorový fázový proud je dán transformačním převodem

$$I_2 = I_1 \frac{m_1 N_{s1} k_{v1}}{m_2 N_{s2} k_{v2}}$$

Ve skutečnosti je však tento proud vlivem rozptylu menší

$$I_2 = \kappa I_1 \frac{m_1 N_{s1} k_{v1}}{m_2 N_{s2} k_{v2}} \quad (234)$$

kde κ je tzv. činitel vazby podle článku 3.12.

Pro klec tedy platí

$$I_2 = \kappa I_1 \frac{m_1 N_{s1} k_{v1}}{\frac{Q_2}{p} \cdot \frac{1}{2} \cdot 1} = \kappa I_1 \frac{2p m_1 N_{s1} k_{v1}}{Q_2} \quad (235)$$

Efektivní proud v jedné tyči je

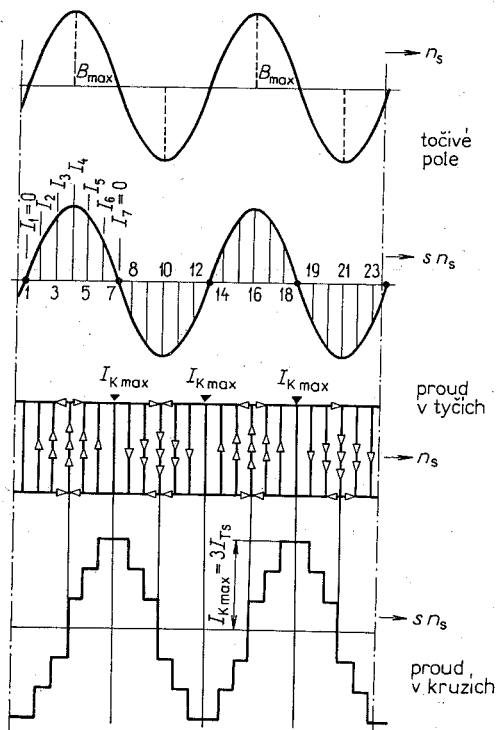
$$I_T = \frac{I_2}{p} = \kappa I_1 \frac{2m_1 N_{s1} k_{v1}}{Q_2} \quad (236)$$

neboť v každé fázi je p tyčí spojeno paralelně.

Okamžité hodnoty proudů v tyčích odpovídají magnetickým induk-
cím, a jsou tedy rozloženy po obvodu sinusově podle obr. 112.

Střední hodnota proudu v tyči je

$$I_{Ts} = \frac{2}{\pi} I_{T\max} = \frac{2}{\pi} \sqrt{2} I_T$$



Obr. 112. Rozložení proudů
v kleci

Proudy všech tyčí se uzavírají spojovacími kruhy klece. Z obr. 112 je vidět, že největší proud prochází kruhem na rozhraní pólů a je dán součtem proudů všech tyčí, které se nacházejí pod polovinou pólu, tedy proudů $Q/(4p)$ tyčí.

Sčítat je možné střední hodnoty, takže největší proud v kruhu je

$$I_{K\max} = \frac{Q_2}{4p} I_{Ts} = \frac{Q_2}{4p} \cdot \frac{2}{\pi} \sqrt{2} I_T$$

Z obr. 112 je také vidět, že i proud v kruzích je po obvodu sinusově rozložen (zubovitě), takže můžeme určit jeho efektivní hodnotu

$$I_K = \frac{I_{K \max}}{\sqrt{2}} = \frac{Q_2 2\sqrt{2} I_T}{\sqrt{2} 4p\pi} = I_T \frac{Q_2}{2\pi p} \quad (237)$$

Má-li podle geometrických rozměrů a materiálu jedna tyč odpor R_T a jeden kruh R_K , jsou celkové ztráty v kleci

$$\begin{aligned} \Delta P_{j2} &= Q_2 R_T I_T^2 + 2R_K I_K^2 = Q_2 R_T I_T^2 + 2R_K \left(I_T \frac{Q_2}{2\pi p} \right)^2 = \\ &= Q_2 I_T^2 \left[R_T + 2R_K \frac{Q_2}{(2\pi p)^2} \right] \end{aligned}$$

Obecně jsou však ztráty v m_2 fázovém vinutí

$$\Delta P_{j2} = m_2 R_2 I_2^2$$

Dosadíme-li pro klec vztahy

$$m_2 = \frac{Q_2}{p} \quad \text{a} \quad I_2 = p I_T$$

jsou ztráty

$$\Delta P_{j2} = \frac{Q_2}{p} R_2 (p I_T)^2$$

Oba výrazy pro ztráty musí být stejné

$$\frac{Q_2}{p} R_2 p^2 I_T^2 = Q_2 I_T^2 \left[R_T + 2R_K \frac{Q_2}{(2\pi p)^2} \right]$$

takže odpor jedné fáze klece je

$$R_2 = \frac{1}{p} \left[R_T + 2R_K \frac{Q_2}{(2\pi p)^2} \right] \quad (238)$$

Tento odpor se přepočte na stator podle upravené rovnice (231)

$$R_{21} = R_2 \frac{m_1}{\frac{Q_2}{p}} \left(\frac{N_{s1} k_{v1}}{1} \cdot 1 \right)^2 = R_2 \frac{4p m_1 N_{s1}^2 k_{v1}^2}{Q_2} \quad (239)$$

Ze známých odporů jednotlivých vinutí můžeme vypočítat ztráty ve vinutí

$$\Delta P_{j1} = m_1 R_1 I_1^2 \quad (240)$$

$$\Delta P_{j2} = m_2 R_2 I_2^2 = m_1 R_{21} I_{21}^2 \quad (241)$$

Celkové Joulovy ztráty ve vinutí jsou

$$\Delta P_j = \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} = m_1 R I_1^2 \quad (242)$$

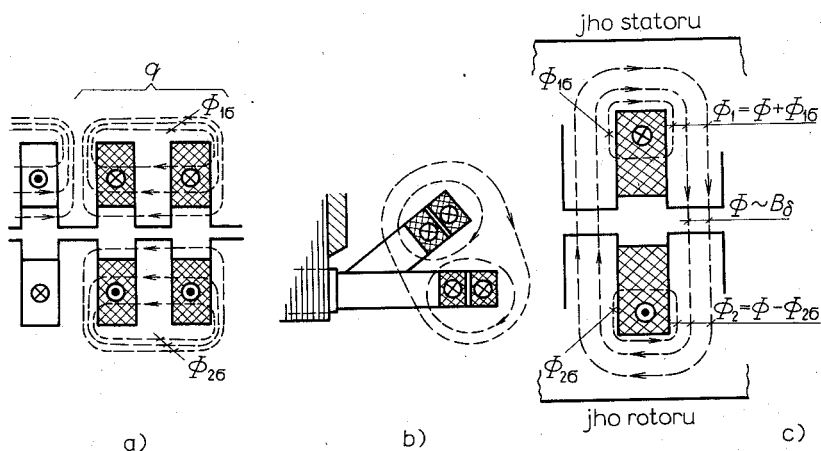
kde celkový odpor jedné fáze

$$R = R_1 + R_{21} \quad (243)$$

3.11. ROZPTYLOVÁ REAKTANCE VINUTÍ

U indukčního motoru se rozptylem rozumí ta část magnetického toku, která neprochází vzduchovou mezerou, ale uzavírá se nakrátko kolem statorového a rotorového vinutí. Rozlišujeme:

1. Drážkový rozptyl, který vytvářejí indukční čáry uzavírající se kolem vodičů v drážce a procházející podle obr. 113a jhem, zuby a prostorem drážky. Pro cívkový svazek s q cívkami se uzavírá kolem q drážek, neboť v zubech se indukční čáry ruší.



Obr. 113. Rozptyl indukčního motoru
a) drážkový, b) kolem čel, c) činitel rozptylu

2. Rozptyl kolem čel vinutí je tvořen indukčními čarami kolem volných čel statorového a rotorového vinutí podle obr. 113b. Zvětšuje ho blízkost aktivního železa a železných konstrukčních částí.

3. Diferenční rozptyl je jen dohodnutým pojmem, jímž se vyjadřuje zmenšení indukovaného napětí vlivem vyšších harmonických v průběhu magnetického toku.

Každému rozptylovému toku odpovídá příslušná náhradní reaktance. Obecně je náhradní reaktance dána vztahem

$$X_{\sigma} = \omega L_{\sigma} = \omega N^2 A_{\sigma} \quad (244)$$

kde L_{σ} je náhradní rozptylová indukčnost,

A_{σ} magnetická vodivost rozptylové cesty,

N počet závitů, kterými je rozptyl buzen.

Pro určení reaktance je třeba stanovit vodivost rozptylové cesty. Obvykle se přitom magnetický odpor železa zanedbává a počítá se jen s vodivostí vzduchové cesty.

Celková rozptylová reaktance je

$$X_{\sigma} = X_{1\sigma} + X_{2\sigma} = X_{d1} + X_{d2} + X_{\xi} + X_{dif} \quad (245)$$

Odvození jednotlivých reaktancí je ve III. díle.

3.12. ČINITEL ROZPTYLU

Na obr. 113 jsou jednoduše vyznačeny hlavní a rozptylové magnetické toky statorového a rotorového vinutí, které jsou vytvořeny dvěma drážkami s opačnými směry proudů.

Statorové vinutí budí magnetický tok Φ_1 , který celý prochází jhem a přibližně i zuby statoru. Jeho část $\Phi_{1\sigma}$ se uzavírá jen kolem statorového vinutí, takže vzduchovou mezerou prochází jen magnetický tok Φ zmenšený o statorový rozptyl.

Kolem rotorového vinutí se uzavírá rozptylový magnetický tok $\Phi_{2\sigma}$, orientovaný přibližně opačně, takže zuby a jhem rotoru prochází magnetický tok zmenšený o rotorový rozptyl.

S tím je třeba počítat při určování magnetické indukce v zubech a ve jhu motoru.

Při návrhu vycházíme z výsledného magnetického toku Φ ve vzduchové mezeře. Magnetický tok jdoucí zuby a jhem statoru je však o rozptyl větší

a magnetický tok jdoucí zuby a jhem rotoru o rozptylový magnetický tok menší.

Rozptylový magnetický tok můžeme vyjádřit jako část výsledného magnetického toku

$$\Phi_{1\sigma} = \tau_1 \Phi$$

$$\Phi_{2\sigma} = \tau_2 \Phi$$

kde τ je číselník rozptylu.

Potom dostáváme

$$\Phi_1 = \Phi + \Phi_{1\sigma} = \Phi + \tau_1 \Phi = \Phi(1 + \tau_1)$$

a z toho

$$\Phi = \frac{1}{1 + \tau_1} \Phi_1 = \kappa_1 \Phi_1 \quad (246)$$

kde výraz

$$\frac{1}{1 + \tau_1} = \kappa_1 \quad (247)$$

je tzv. primární číselník vazby.

Podobně platí

$$\Phi = \Phi_2 + \Phi_{2\sigma} = \Phi_2 + \tau_2 \Phi_2 = \Phi_2(1 + \tau_2)$$

a

$$\Phi_2 = \frac{1}{1 + \tau_2} \Phi = \kappa_2 \Phi \quad (248)$$

kde κ_2 sekundární číselník vazby.

Z poměru

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{\Phi(1 + \tau_1)}{\Phi \frac{1}{1 + \tau_2}} = (1 + \tau_1)(1 + \tau_2) \quad (249)$$

vychází

$$\Phi = \frac{1}{1 + \tau_1} \cdot \frac{1}{1 + \tau_2} \Phi_1 = \kappa_1 \kappa_2 \Phi_1 = \kappa \Phi_1 \quad (250)$$

kde

$$\kappa = \kappa_1 \kappa_2 = \frac{1}{1 + \tau} \quad (251)$$

je tzv. celkový činitel vazby.

Činitel rozptylu je přibližně

$$\tau = \frac{X_\sigma}{X_\mu} \quad (252)$$

a celkový činitel vazby

$$\kappa = \frac{1}{1 + \tau} = \frac{1}{1 + \frac{X_\sigma}{X_\mu}} \quad (253)$$

Přibližně bývá $\kappa_1 = \kappa_2 = (0,94 \text{ až } 0,98)$ nebo přímo

$$\kappa = (0,94 \text{ až } 0,98)^2 = 0,88 \text{ až } 0,96 \quad (254)$$

Větší hodnoty odpovídají mnohopólovým strojům.

S tímto odvozeným činitelem vazby se počítalo v rovnici (234) při určování proudu rotoru z transformačního poměru.

3.13. KRUHOVÝ DIAGRAM

3.13.1. Odvození

Zjednodušenému náhradnímu schématu indukčního motoru odpovídá fázorový diagram na obr. 109, který vychází z podmínek daných vztahy

$$I_1 + I_{21} = I_0 = I_\mu + I_{Fe} \quad (255)$$

$$U_1 + I_{21}R_{21} + jI_{21}X_{21\sigma} + jI_{21}X_{1\sigma} + I_{21}R_1 = 0$$

z toho pak dostaneme

$$U_1 = I_{21}(R_1 + R_{21}) + jI_{21}(X_{1\sigma} + X_{21\sigma}) = I_{21}R + jI_{21}X_\sigma \quad (256)$$

Úbytky napětí tvoří pravoúhlý trojúhelník, jehož vrchol se při změně zatížení (skluzu) posouvá po kružnici nad průměrem U_1 .

Trojúhelník $A_0A_1A_i$, který můžeme dokreslit k ramenu I_{21} , je podobný trojúhelníku úbytků napětí, a proto se bude i jeho vrchol pohy-

bovat po kružnici nad průměrem A_0A_1 . Tento průměr je kolmý na napětí U_1 a představuje největší proud, který by procházel rotorovým obvodem, kdyby se všechny jeho činné odpory rovnaly nule, a byl by tedy omezen jen reaktancí vinutí.

Tento teoretický rotorový proud by byl

$$I_{21ki} = \frac{U_1}{j(X_{1\sigma} + X_{21\sigma})} + \frac{U_1}{jX_{\sigma}} \quad (257)$$

Z toho vychází, že při změně zatížení se pohybuje konec fázoru proudu I_{21} a tím i fázoru I_1 po kružnici nad průměrem I_{21ki} .

Tato kružnice představuje kruhový diagram indukčního motoru (Heyland asi r. 1900). Z něho lze pohodlně zjistit všechny provozní vlastnosti motoru.

Toto odvození kruhového diagramu je značně zjednodušeno.

3.13.2. Vyhodnocení kruhového diagramu

Z jednoduchého kruhového diagramu na obr. 114 vychází:

1. Průměr kružnice určuje teoretický rotorový proud nakrátko I_{21ki} ,
2. Skutečný rotorový proud nakrátko vychází z rovnice (200) a (202) pro $s = 1$ a pro

$$\frac{R_{21}}{s} (1 - s) = 0$$

$$I_{21k} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R_{21})^2 + (X_{1\sigma} + X_{21\sigma})^2}} \quad (258)$$

s fázovým posunem, pro který platí

$$\operatorname{tg} \varphi_{2k} = \frac{X_{\sigma}}{R} \quad (259)$$

Tento proud je menší než proud I_{21ki} a na kružnici mu odpovídá bod A_k , takže platí

$$\overline{A_0A_k} = I_{21k} \quad \overline{OA_k} = I_{1k}$$

3. Z diagramu pro $\operatorname{tg} \varphi$ vychází

$$\operatorname{tg} \varphi_{2k} = \frac{\overline{A_0Q}}{\overline{A_kQ}} \quad (260)$$

Porovnáním rovnic (259) a (260) dostaneme

$$\overline{A_k Q} \sim R = R_1 + R_{21} \quad \overline{A_0 Q} \sim X_\sigma = X_{1\sigma} + X_{21\sigma} \quad (261)$$

4. Krajním případem provozu indukčního motoru je chod při skluzu $s \rightarrow \infty$. Z rovnice pro skluz je vidět, že skluzu většího než jedna může stroj nabýt při záporných otáčkách. Nekonečnému skluzu tedy odpovídají nekonečně velké otáčky proti směru točivého magnetického pole.

Pro $s \rightarrow \infty$ je impedance podle rovnice (201)

$$\mathbf{Z} = \left(R_1 + \frac{R_{21}}{s} \right) + j(X_{1\sigma} + X_{21\sigma}) = R_1 + j(X_{1\sigma} + X_{21\sigma}) \quad (262)$$

Fázor příslušného rotorového proudu $I_{21\infty}$ je dán úsečkou

$$I_{21\infty} \sim \overline{A_0 A_\infty}$$

a jeho fázový posun vztahem

$$\operatorname{tg} \varphi_{2\infty} = \frac{X_{1\sigma} + X_{21\sigma}}{R_1} \quad (263)$$

Z trojúhelníka ($A_0 V Q$) je ale

$$\operatorname{tg} \varphi_{2\infty} = \frac{\overline{VQ}}{\overline{A_0 Q}} \quad (264)$$

Porovnáním rovnic (263) a (264) dostáváme

$$\overline{VQ} \sim R_1 \quad (265)$$

a porovnáním se vztahem (261) je

$$\overline{VA_k} \sim R_{21} \quad (266)$$

To znamená, že spojnice $\overline{A_0 A_\infty}$ dělí pořadnici $\overline{A_k Q}$ bodem V v poměru odporů

$$\frac{\overline{VQ}}{\overline{VA_k}} = \frac{R_1}{R_{21}} \quad (267)$$

5. Určitému zatížení motoru odpovídá na kružnici bod A_1

$$\overline{OA_1} = I_1 \quad (268)$$

$$\overline{A_1 A_0} = I_{21} \quad (269)$$

6. Délka kolmice z bodu A_1 na směr proudu I_μ je

$$\overline{A_1P} = I_1 \cos \varphi_1$$

a to při stálém napětí U_1 a stálém počtu fází m_1 znamená, že je úměrná *příkonu motoru*

$$\overline{A_1P} \sim P_1 \quad (270)$$

Směr magnetizačního proudu udává tedy tzv. *přímkou příkonů*.

7. Protože

$$I_{Fe} = \overline{PT} = \frac{\Delta P_0}{U_1}$$

je úsek \overline{PT} úměrný ztrátám naprázdno

$$\overline{PT} \sim \Delta P_0$$

8. Úsek $\overline{A_1T}$ představuje tedy celkový činný výkon obvodu (obr. 107c)

$$\begin{aligned} \overline{A_1T} \sim P_1 - \Delta P_0 &= m_1 I_{21}^2 \left[R_1 + R_{21} + \frac{R_{21}}{s} (1 - s) \right] = \\ &= \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} + P \end{aligned}$$

kde P je užitečný mechanický výkon na hřídeli.

9. Z úměry a ze vztahu (267) dostaneme

$$\frac{\overline{MT}}{\overline{MN}} = \frac{\overline{VQ}}{\overline{VA_k}} = \frac{R_1}{R_{21}}$$

takže úseky \overline{MT} a \overline{MN} jsou úměrné ztrátám

$$\overline{MT} \sim \Delta P_{j1} \quad (271)$$

$$\overline{MN} \sim \Delta P_{j2} \quad (272)$$

10. Zbytek příkonu, daný úsečkou $\overline{A_1N}$, udává tedy mechanický výkon motoru

$$\overline{A_1N} \sim P \quad (273)$$

a přímka $\overline{A_0A_k}$ je tzv. *přímkou výkonů*.

Každému proudu I_1 odpovídá na kružnici určitý bod A a určitý výkon P , daný délkou pořadnice až k přímce výkonů. Pro chod naprázdno (A_0) i pro chod nakrátko (A_k) je výkon $P = 0$, motor nekoná práci.

11. Největší výkon P_{\max} odpovídá dotykovému bodu tečny rovnoběžné s přímkou výkonů (A_P)

$$P_{\max} \sim \overline{A_P N_P} \quad (274)$$

12. Účinnost pro dané zatížení (bod A_1) je dána poměrem

$$\eta = \frac{\overline{A_1 N}}{\overline{A_1 P}} \quad (275)$$

13. Z rovnice (214) je užitečný moment na hřídeli úměrný součtu $P + \Delta P_{j2}$, tedy v kruhovém diagramu úsečce $\overline{A_1 M}$

$$\overline{A_1 M} \sim M \quad (276)$$

Přímka $\overline{A_0 A_\infty}$ je tzv. *přímka momentů*. Pro chod naprázdno je moment $M = 0$.

14. Při chodu nakrátko (A_k) má motor záběrný moment

$$M_z \sim \overline{A_k V} \quad (277)$$

což odpovídá rovnici (215) pro skluz $s = 1$.

15. Maximální moment odpovídá dotykovému bodu tečny rovnoběžné s přímkou momentů (A_M)

$$M_{\max} \sim \overline{A_M M_M} \quad (278)$$

Momentová přetížitelnost je dána poměrem

$$\frac{M_{\max}}{M_n} = \frac{\overline{A_M M_M}}{\overline{A_1 M}} \quad (279)$$

16. Z kruhového diagramu lze číst i skluz, který je dán pro určitý proud I_1 úsečkou \overline{CF} poměrem

$$s = \frac{\overline{CF}}{\overline{CD}} \quad (280)$$

Zvolíme-li takové měřítko, aby úsečka $\overline{CD} = 1$, bude bod C odpovídat skluzu $s = 0$ a bod D skluzu $s = 1$ a skluz pro určitý proud bude dán přímo úsečkou

$$s = \overline{CF} \quad (281)$$

Je vhodné rozdělit stupnici skluzu \overline{CD} na 10 nebo 100 dílků a potom každý dílek odpovídá skluzu 0,1 nebo 0,01.

3.13.3. Postup kreslení kruhového diagramu

1. Při kreslení vycházíme z fázových proudů naprázdno a nakrátko, které nakreslíme ve zvoleném měřítku

$$m_I \quad [A \text{ mm}^{-1}]$$

Fázory můžeme vynášet přímo podle jejich účinku za pomoci kružnice o průměru 100 mm a pomocné stupnice $\cos \varphi$. S její pomocí můžeme číst přímo i účinek ostatních sestrojovaných fázorů.

Přesnější je vynášet proud I_0 ne podle $\cos \varphi_0$, který je velmi malý, ale pomocí jeho složek I_μ a I_{Fe} .

2. Napětí U_1 zakreslujeme bez měřítka, jen symbolicky.

3. Kružnice kruhového diagramu musí procházet body A_0 a A_k , proto její střed leží v průsečíku přímky A_0Q s její osou souměrnosti.

4. Přímku momentovou sestrojíme pomocí bodu V, kterým se úsečka A_kQ rozdělí v poměru R_1/R_2 .

5. Výkony, příkony a ztráty celého motoru pro uvažovaný proud I_1 (bod A_1) čteme na kolmici k přímce momentů v měřítku

$$m_P = m_1 U_1 m_I \cdot 10^{-3} \quad [kW \text{ mm}^{-1}; A \text{ mm}^{-1}] \quad (282)$$

6. Momenty čteme v měřítku

$$m_M = \frac{9550}{n_s} m_P \quad [Nm \text{ mm}^{-1}; \text{min}^{-1}, kW \text{ mm}^{-1}] \quad (283)$$

Ze zvolených a vypočtených měřítek můžeme vyznačit pomocné stupnice veličin I , P , M .

7. Stupnici skluzu vyneseme rovnoběžně s přímkou momentů tak, aby nerušila přehlednost diagramu. Rozdělí se na 10, popř. 100 dílků.

Popisovaný jednoduchý diagram nevystihuje úplně skutečné poměry v indukčním motoru. Je však jednoduchý a názorný a úplně stačí k posouzení základních vlastností motoru. Ve výrobních závodech se používá různých konstrukcí kruhových diagramů, které se od sebe liší zejména konstrukcí středu.

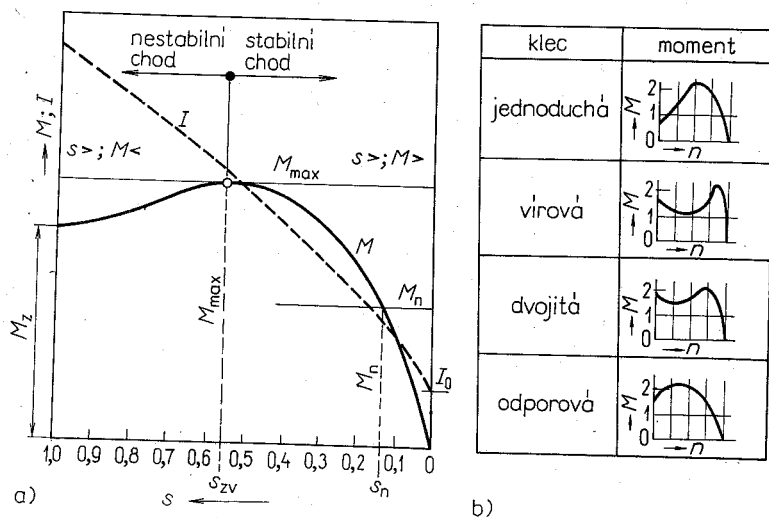
Poznámka. Konstrukce kruhových diagramů pro motory s výkonem nad 100 kW je uvedena v ČSN 35 0301.

3.14. VLASTNOSTI INDUKČNÍHO MOTORU

3.14.1. Momentová charakteristika

Závislost momentu na skluzu lze vyšetřovat matematicky, např. na základě vhodně upravené rovnice (215), nebo jednoduše z kruhového diagramu tak, že pro různé skluzu s se do diagramu vynesou odpovídající momenty M .

Normální průběh momentové charakteristiky motoru s kotvou nakrátko je na obr. 115a. Kreslí se v rozsahu $s = (0 \text{ až } 1)$, což odpovídá rozsahu otáček $n = (n_s \text{ až } 0)$. Zvlášť se vyznačí jmenovitý moment M_n , odpovídající jmenovitým otáčkám, a moment maximální odpovídající tzv. momentu zvratu M_{\max} .



Obr. 115. Normální průběh momentové charakteristiky, typické průběhy momentových charakteristik v závislosti na druhu klece podle

ČSN 35 0300

Momentová přetížitelnost je podle ČSN 35 0000

$M_{\max}/M_n \geq 1,6$ pro motory s trvalým zatížením

$M_{\max}/M_n \geq 2$ pro motory s přerušovaným zatížením

$M_{\max}/M_n \geq 1,5$ pro motory upravené pro rozběh s malým spouštěcím proudem, menším než 4,5násobek I_n .

Momentové přetížení musí motor vydržet po dobu 15 s a nesmí se přitom zastavovat.

Momentová přetížitelnost závisí na průměru kruhu, tedy na reaktanci motoru. Menší reaktanci odpovídá větší průměr [rovnice (157)] a tím i větší přetížitelnost.

Maximálnímu momentu přísluší skluz s_{zv} . Zvětší-li se vnější zatěžovací moment nad maximální moment M_{max} , zvětší se skluz nad hodnotu s_{zv} , moment klesne pod hodnotu M_{max} a motor se zastaví.

V oblasti skluzu $s > s_{zv}$ nemůže motor pracovat.

Při chodu nakrátko (po připojení na síť nebo při zastavení způsobeném přetížením) vykazuje motor záběrný moment M_z , jímž se motor rozbíhá jen tehdy, je-li vnější zatěžovací moment menší.

Poměr záběrného momentu k momentu jmenovitému není u nás normalizován. Průměrně bývá $M_z = (1 \text{ až } 2) M_n$.

Norma ČSN 35 0300 předepisuje tzv. *nejmenší rozběhový moment*, jímž se rozumí nejmenší hodnota točivého momentu během rozběhu, tedy v rozsahu od nulových otáček k otáčkám odpovídajícím momentu zvratu. Nesmí být u motorů nakrátko menší než

$0,5M_n$, nejméně $0,5M_z$ pro $P < 100 \text{ kW}$

$0,3M_n$, nejméně $0,5M_z$ pro $P > 100 \text{ kW}$

$0,3M_n$ pro motory jednofázové a motory s přepínáním počtu pólů.

Pro rozběh motoru není tedy rozhodující samotný záběrný moment, ale i jeho průběh během rozběhu, který se u různé konstrukce motoru může od normálního průběhu značně lišit. Typické průběhy momentů pro různé druhy klecí jsou na obr. 115b.

Motor pro daný druh pohonu musí být navržen tak, aby zatížení za provozu nepřestoupilo maximální moment a aby moment motoru ani během rozběhu neklesl pod zatěžovací moment.

Nestačí tedy určení motoru jen podle samotného výkonu, jak se to často z pohodlnosti dělá.

Na průběh momentové charakteristiky a na záběrný moment má největší vliv činný odpor rotoru.

Změnou rotorového odporu se nemění průměr kružnice a stejně se nemění ani poloha momentové přímký, neboť její směrnice závisí jen na statorovém odporu R_1 . Většímu rotorovému odporu odpovídá menší zkratový proud a tomu odpovídající nový bod A_k se posouvá po kružnici směrem doleva, takže se záběrný moment zvětšuje. Vhodným rotorovým odporem můžeme dosáhnout toho, že se záběrný moment rovná momentu maximálnímu.

Zvětšováním rotorového odporu se současně zkracuje stupnice skluzu, takže určitému momentu, např. M_n , odpovídá při větším odporu větší skluz.

Při zanedbatelně malé reaktanci rotorového vinutí je rotorový proud

$$I_2 = \frac{U_{i2}}{R_2} = \frac{sU_{i20}}{R_2}$$

a při stálém napětí U_{i20}

$$I_2 \sim M \sim \frac{s}{R_2} \quad (284)$$

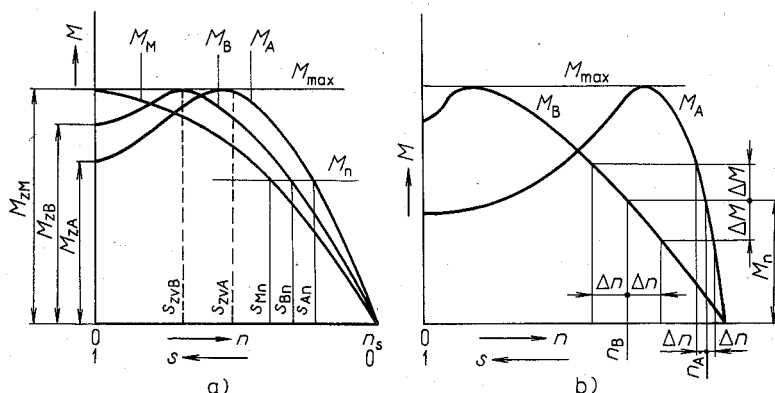
takže při stálém momentu musí zvětšenému odporu R_2 odpovídat větší skluz, aby se zvětšilo indukované napětí potřebné k vyvolání stejného proudu ve větším odporu.

Skluzu jsou tedy přímo úměrné rotorovým odporům

$$\frac{s_A}{s_B} = \frac{R_{2A}}{R_{2B}} \quad (285)$$

Motor s větším odporem v rotoru dosáhne určitého momentu při větším skluzu než motor s menším odporem v rotoru. Je to vidět i z charakteristik na obr. 116.

Všechny mají stejný moment zvratu, rovnající se M_{\max} . Charakteristiky motorů s větším odporem R_2 vykazují větší záběrný moment, ale nejsou tak strmé, takže otáčky jsou více závislé na zatížení (obr. 116b).



Obr. 116. a) Momentové charakteristiky pro různý odpor rotoru, b) změna otáček při změně zatížení

3.14.2. Přehled základních vlastností motoru

1. Funkčně i konstrukčně je velmi jednoduchý, bez složitých a choulostivých částí.
2. Vnější tvarem se dá přizpůsobit poháněnému stroji.
3. Provozně je spolehlivý, má malou poruchovost a dobře vzdoruje elektrickým i mechanickým poškozením.
4. Nevyžaduje odbornou obsluhu.
5. Údržba je jednoduchá.
6. Dá se lehce a jednoduše ovládat, takže je vhodný pro dálkové a automatické řízení.
7. Otáčky nelze libovolně měnit, ale jsou dány kmitočtem a počtem pólů. Otáčky lze měnit jen v hrubých skocích vhodnou volbou počtu pólů. U kroužkových motorů můžeme změnou rotorového odporu zmenšovat otáčky pod jmenovitou hodnotu.
8. Otáčky jsou jen málo závislé na zatížení.
9. Otáčky téměř nezávisí na napětí.
10. Motor se sám rozbíhá s poměrně dobrým záběrným momentem, který můžeme podle potřeby vhodně ovlivnit velikostí a charakterem rotorového odporu.
11. Motor je možné značně přetížít. Přetížitelnost můžeme ovlivnit reaktancí vinutí.
12. Při malém zatížení zhoršuje motor účinnost sítě.
13. Při připojení k síti způsobuje poměrně velký proudový náraz. Záběrný proud bývá $I_z = 5I_n$, podle ČSN 35 0300 musí být menší než $7,5I_n$.
14. Moment i výkon jsou úměrné druhé mocnině napětí

$$M \sim P \sim U^2 \quad (286)$$

a s tím je třeba počítat zejména při rozběhu, kdy záběrný proud může zejména ve starých rozvodech způsobit značné úbytky napětí.

3.15. SPOUŠTĚNÍ INDUKČNÍCH MOTORŮ

3.15.1. Všeobecné zásady

Spouštění (připojení k síti) je největším provozním problémem indukčních motorů. Charakteristickým údajem je záběrný proud a jemu odpovídající

záběrný moment. Snahou je, aby záběrný proud byl malý a záběrný moment co největší.

Z hlediska spouštění je nejvýhodnější kroužkový motor, u něhož můžeme vhodnou volbou rotorového odporu libovolně zmenšit záběrný proud a záběrný moment zvětšit až na moment zvratu. Kroužkové motory jsou však složitější, choulostivější, a vzhledem k motorům s kotvou nakrátko mají další nevýhody.

Výhody motoru s kotvou nakrátko ve srovnání s kroužkovým motorem jsou:

1. Větší účinník zejména u menších výkonů. Účinníky se vyrovnávají při výkonech nad 30 kW.
2. Větší účinnost při menších výkonech.
3. Větší přetížitelnost.
4. Možnost většího oteplení rotoru.
5. Konstrukční jednoduchost; odpadají kartáče, kroužky apod.
6. Menší hmotnost a nižší cena.

Použitelnost motoru nakrátko je omezena předpisy energetických závodů.

Motory s kotvou nakrátko můžeme spouštět:

- a) přímým připojením k síti,
- b) statorovým spouštěčem,
- c) přepínačem Y/D,
- d) spouštěcím transformátorem,
- e) použitím rozběhové spojky.

Zmenšení záběrného proudu a zvětšení záběrného momentu umožňuje:

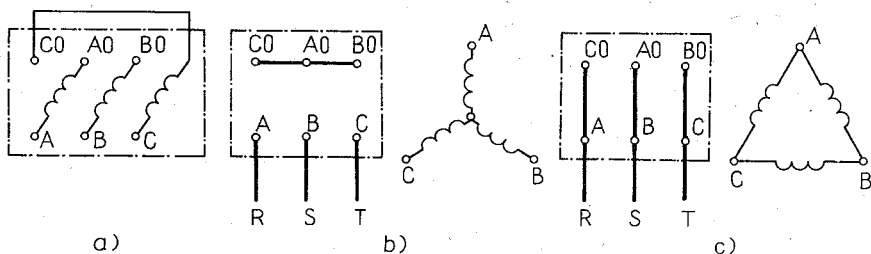
- a) odporová klec,
- b) dvojitá klec.
- c) vírová klec.

Předpisy pro připojování motorů k síti jsou v ČSN 34 1350.

3.15.2. Úprava svorkovnice

Vlastní připojení motoru umožňuje zpravidla šest svorek statorové svorkovnice, která bývá upravena podle obr. 117a. Začátky vinutí jednotlivých fází jsou označeny A, B, C, konce A0, B0, C0 (ČSN 34 3230.)* Pomocí

*) Pozn. red.: Nové značení svorek je v ČSN 34 0160 z roku 1976 (viz str. 63).



Obr. 117. Úprava statorové svorkovnice

svorek můžeme vinutí přepojit do hvězdy nebo do trojúhelníka. Jen motory do 3 kW a kroužkové motory na napětí 500 V nebo o výkonu větším než 100 kW mají svorkovnici jen se třemi svorkami.

Způsob zapojení musí být vyznačen na štítku, např. údajem 380 V – Δ .

Většina našich motorů se vyrábí tak, aby bylo možné je používat na síť o napětí 380 V i 220 V. Na štítku mívají označení 380/220 V – Y/ Δ . To znamená, že v síti se sdruženým napětím 3×380 V se zapojí vinutí do hvězdy (obr. 117b) a v síti se sdruženým napětím 3×220 V do trojúhelníka (obr. 117c).

Vinutím motoru prochází v obou případech stejný proud, a motor má tedy při obou napětích stejný výkon. Jen při napětí 220 V prochází přívodními vodiči proud $\sqrt{3}$ krát větší.

Kostra motoru se musí prostřednictvím uzemňovací svorky připojit na uzemnění nebo na nulovací vodič trojfázové sítě.

3.15.3. Přímé připojení k síti

Motor se připojí k síti pomocí:

a) trojpolového spínače (stiskací, válcový, vačkový); pojistky musí být mezi motorem a spínačem, aby byla jejich výměna bezpečná – ČSN 34 3230 (obr. 118).

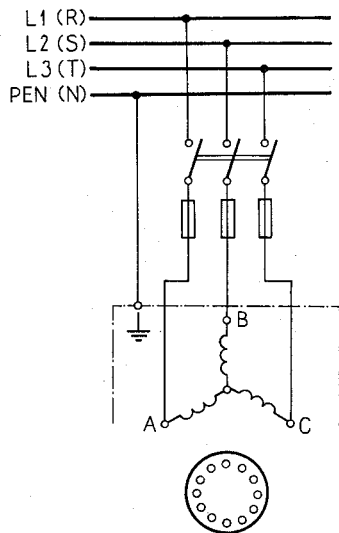
b) stykače (při dálkovém ovládní); pojistky musí být před stykačem, který je jimi současně chráněn, proti tepelnému přetížení se kombinuje s tepelným relé.

c) jističe, který současně zastupuje i zkratovou nadproudovou ochranu.

Jestliže jsou z nějakých důvodů pojistky před vypínačem, musí to být uvedeno na zvláštní výstražné tabulce.

Reverzace se uskutečňuje záměnou libovolných dvou přívodních vodičů (reverzační přepínač nebo stykačová reverzační kombinace).

Podle ČSN 34 1350 se mohou přímo k síti připojit motory, jejichž zapínací výkon nepřekročí 22 kVA, tedy asi do výkonu 3 kW.



Obr. 118. Připojení indukčního motoru trojpolovým spínačem

Připojení motorů větších výkonů je třeba uskutečnit použitím vhodného způsobu vedoucího ke zmenšení záběrného proudu.

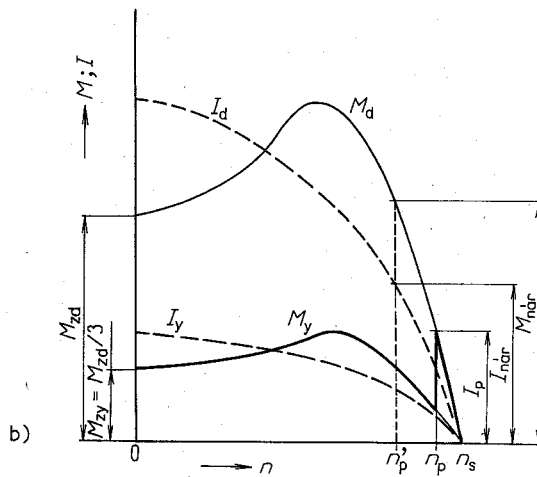
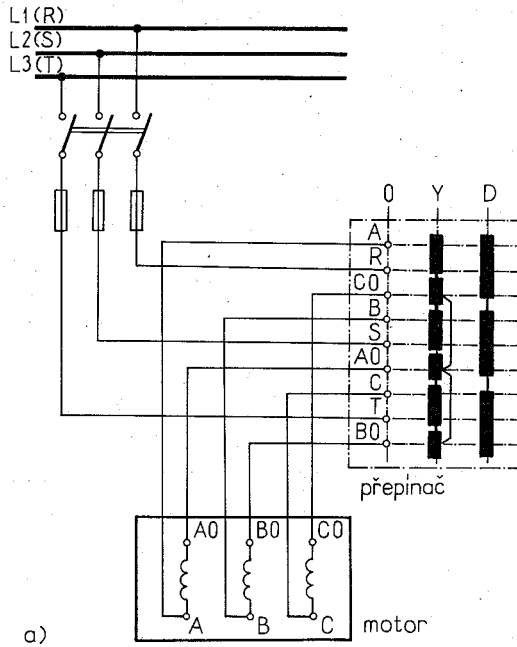
Po dohodě s energetickým rozvodným závodem můžeme k síti připojit přímo i motory o větším výkonu.

3.15.4. Přepínač hvězda—trojúhelník

Motor se k síti připojí v zapojení do hvězdy a po rozběhu asi na 85 % jmenovitých otáček se zvláštním přepínačem přepne do trojúhelníka (obr. 119a). Motor musí mít vinutí dimenzované na trvalé zapojení do trojúhelníka, tedy každou fází na sdružené napětí.

Použitím přepínače Y/D se zmenší záběrný proud na 1/3 plného záběrného proudu při zmenšení momentu také na 1/3.

Důkaz (obr. 120):



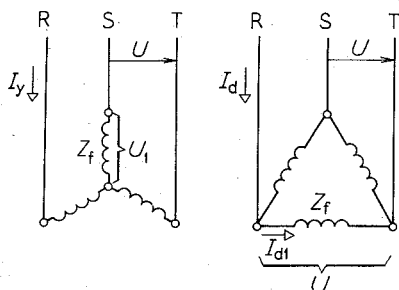
Obr. 119. a) Schéma přepínače Y/D, b) průběh momentu a proudu při spouštění přepínačem Y/D

Fázový záběrný proud při spojení do D je

$$I_{d1} = \frac{U}{Z_f}$$

a proud v přívodu, rozhodující pro posouzení,

$$I_d = \sqrt{3} I_{d1} = \frac{\sqrt{3} U}{Z_f}$$



Obr. 120. Odvození poměrů při spouštění přepínačem Y/D

Při spojení do Y je proud v přívodních vodičích (i ve vinutí)

$$I_y = \frac{U_1}{Z_f} = \frac{U}{\sqrt{3} Z_f}$$

Porovnáním dostaneme

$$\frac{I_y}{I_d} = \frac{\frac{U}{\sqrt{3} Z_f}}{\frac{\sqrt{3} U}{Z_f}} = \frac{1}{3} \quad (287)$$

Přitom svorkové napětí je sníženo při rozběhu jen třikrát, a tomu odpovídá zmenšení momentu na 1/3.

S ohledem na zmenšený záběrný moment lze spouštět přepínačem Y/D jen motory, které se rozbíhají bez zatížení, naprázdno, nebo jen s malým zatížením (ventilátory, obráběcí stroje, pily, stroje v zemědělství apod.). Přepínač se používá od výkonů asi 4 kW, podle ČSN 34 1315 se smí použít do výkonu 15 kW. Po zapojení do hvězdy musí motor dosáhnout alespoň 85 % jmenovitých otáček.

Přepínač Y/D musí být konstruován tak, aby ho nebylo možné rychle přepnout z polohy Y do polohy D. Předčasné přepnutí vyvolá značný proudový náraz (jak to vyplývá z charakteristiky na obr. 119b).

Proudy i momenty pro spojení do Y jsou třetinové. Správně se přepíná při otáčkách n_p , při nichž se nový proudový náraz rovná nejvýše prvnímu proudovému nárazu I_p .

Předčasným přepnutím vznikne proudový a momentový náraz $I_{nár}$, $M_{nár}$, který úplně zruší výhodu přepínače. K předčasnému přepnutí dochází i tehdy, jestliže motor není svou charakteristikou přizpůsoben průběhu zatěžovacího momentu.

3.15.5. Spouštěcí transformátor

Větší motory, které vyžadují větší zmenšení záběrného proudu, než jaké umožňuje přepínač Y/D, se připojují k síti přes jednoduchý autotransformátor, který má podle potřeby několik sekundárních odboček, obvykle na 50, 65 a 80 % závitů. Spouštěcí transformátor se používá velmi zřídka.

3.15.6. Rozběhová spojka

Rychlý rozběh bez zatížení umožňují rozběhové spojky. Jsou to třecí spojky, montované přímo do řemenice, které jsou v klidu rozpojeny. Zapojí se jen po dosažení určitých otáček působením odstředivé síly.

Podle ČSN 34 1350 se mají rozběhové spojky používat při těžkém rozběhu do výkonu 7,5 kW, jde-li o motor se spouštěcím nárazem větším než 22 kVA.

Použitím rozběhové spojky se nezmenší záběrný proud, jen se zkrátí doba rozběhu, což kromě jiného zvýhodní nadproudové jištění.

3.15.7. Odporová klec

Odporová klec má tyče i kruhy zhotovené z materiálu o větším měrném odporu např. z mosazi, siluminu apod. Většímu odporu rotorového obvodu odpovídá větší záběrný moment, ale současně i větší skluz a horší účinnost motoru.

Odporové klece se používají u jeřábových a výtahových motorů, kde je velký záběrný moment zvláště důležitý, ale kde při přerušovaném chodu není zhoršená účinnost rozhodující.

Vhodným odporem klece můžeme dosáhnout toho, že záběrný moment se může rovnat momentu maximálnímu.

Zvětšení odporu zmenšením samotného průřezu není vhodné, neboť menšímu průřezu odpovídá menší tepelná kapacita a tím i větší oteplení.

3.15.8. Dvojitá klec

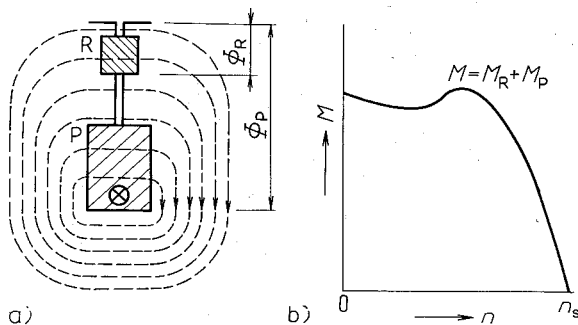
Dvojitá klec (Boucherot) má dvě soustavy tyčí nestejného průřezu nad sebou nebo vedle sebe. Tyto tyče jsou spolu spojeny vodivými kruhy (obr. 121a). Tato klec byla diktována snahou zhotovit motor, který by v sobě spojoval výhody jednoduché klece při normálním chodu s výhodami odporové klece při rozběhu.

Touto klecí dosáhneme zvětšení záběrného momentu a zmenšení záběrného proudu.

Důkaz

Na obr. 121a je vyznačena jedna tyč rozběhové klece R a pod ní, hluboko v železe rotoru, tyč pracovní klece P. Tyč pracovní klece je spřažena s plným rozptylovým magnetickým tokem Φ_p , avšak tyč rozběhové klece je spřažena jen s jeho malou částí Φ_R . Při rozběhu, kdy prochází tyčemi proud síťového kmitočtu, je reaktance spodní tyče mnohonásobně větší než reaktance horní tyče.

Rotorový záběrný proud se do obou tyčí rozdělí nepřímo úměrně impedancím. Jeho větší část prochází horní rozběhovou klecí, která má ale větší odpor (menší průřez, horší měrnou vodivost) a chová se jako odporová klec. Motor se rozbíhá s větším momentem a menším proudem.



Obr. 121. Dvojitá klec

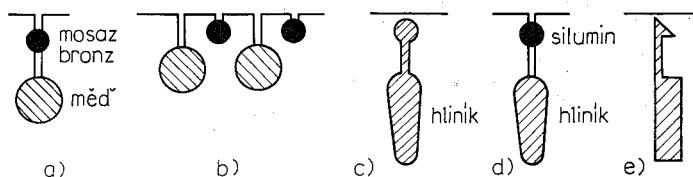
a) vysvětlení funkce, b) momentová charakteristika

Za chodu je skluzový kmitočet malý, reaktance tyčí je nepatrná a proud se rozdělí paralelně do obou tyčí nepřímě úměrně jejich odporům. Motor se chová jako normální motor s jednoduchou klecí.

Momentová charakteristika se získá sečtením charakteristiky pracovní (M_p) a rozběhové klece (M_R) podle obr. 121b.

Vhodnou úpravou obou klecí můžeme momentovou charakteristiku motoru v širokých mezích ovlivnit a přizpůsobit potřebám stroje.

Vlastnosti motoru s dvojitou klecí jsou za chodu trochu horší než vlastnosti motoru s jednoduchou klecí.



Obr. 122. Úprava tyčí dvojitě klece

Původní dvojitě klece měly kruhové měděné tyče, rozběhové tyče byly z bronzu nebo z mosazi (obr. 122). Hliníkové klece mají tyče podle obr. 122c. Motory nad 50 kW mají rozběhové tyče ze siluminu, který má větší měrný odpor a určuje tyčím větší průřez s větší tepelnou kapacitou (obr. 122d). Z výrobních důvodů mohou mít tyče tvar podle obr. 122e; drážky se mohou vyrobít pomocí silnějších a trvanlivějších přípravků.

Vzduchová mezera mezi oběma tyčemi musí být proto, aby se celý rozptylový magnetický tok neuzavíral jen kolem horní tyče.

Dnes se téměř všechny motory nad 4 kW vyrábějí s dvojitou klecí.

3.15.9. Vírová klec

Vírová klec má tyče uloženy v úzkých a hlubokých drážkách. Vírovou klecí lze dosáhnout zvětšení záběrného momentu a zmenšení záběrného proudu na podobném principu jako u klece dvojitě (obr. 123).

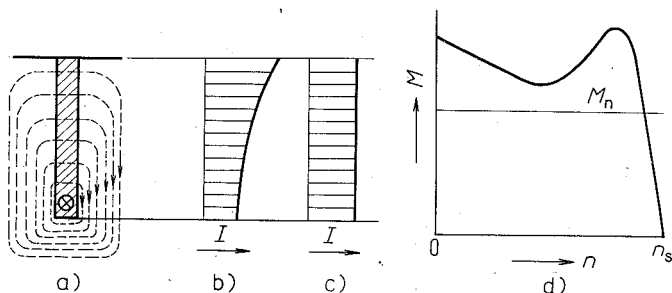
Spodní vlákna vysoké tyče jsou spřažena s větším rozptylovým magnetickým tokem než horní vlákna tyče, takže při rozběhu mají větší reaktanci a proud se z nich vytlačuje do horních vrstev (obr. 123b). Proud

tedy prochází menším průřezem a klec se chová jako odporová. Za chodu se proud rozdělí téměř rovnoměrně po celém průřezu podle obr. 123c.

Vírovou klecí nelze dosáhnout takové kombinace momentových charakteristik a takového zvětšení záběrného momentu, jako dvojitou klecí. Naproti tomu je však výrobně jednodušší, a proto oblíbená.

Obvyklý průběh momentu je na obr. 123d.

Motory s vírovou klecí se používají zejména pro větší výkony, vysoká napětí a poměrně menší požadované záběrné momenty.

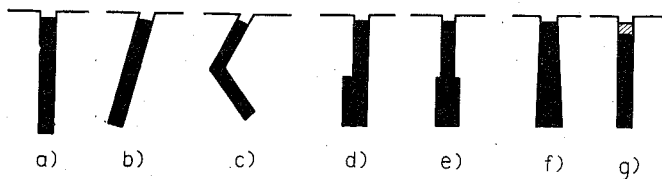


Obr. 123. Vírová klec

a) rozložení indukčních čar, b) rozložení proudu při rozběhu, c) rozložení proudu za chodu, d) momentová charakteristika vírové klece

Tyče mají různé tvary znázorněné na obr. 124.

Zúžení profilu v horní části má zvětšit činný odpor za rozběhu. Stejněho účinku lze dosáhnout ještě výhodnější kombinací tyčí s nestejným měrným odporem (obr. 124g). Tyče mohou mít i různé mechanické vlastnosti. Klínový tvar podle obr. 124f se zvláště hodí pro rychloběžné motory, neboť se odstředivou silou neuvolňuje.

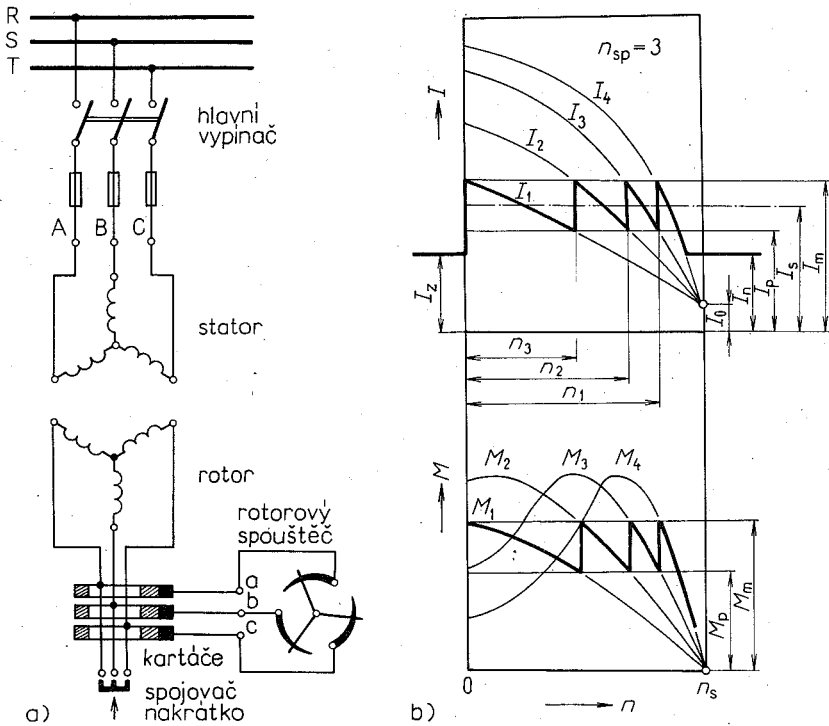


Obr. 124. Tvary tyčí vírové klece

3.16. KROUŽKOVÝ MOTOR

3.16.1. Popis a ovládání

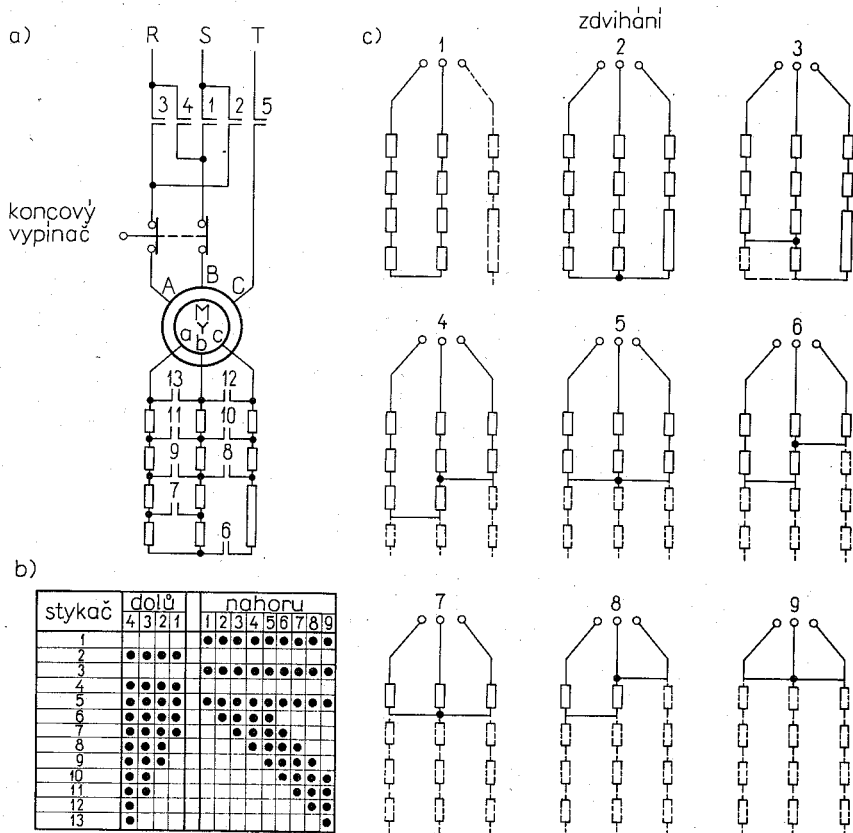
Rotor kroužkového motoru má normální trojfázové vinutí, obvykle trvale spojené do hvězdy. Začátky vinutí jsou připojeny ke třem sběracím kroužkům, na které dosedají tři uhlíkové kartáče, zapojené na rotorovou svorkovnici (a, b, c). Prostřednictvím sběracího mechanismu můžeme do rotorového obvodu zapojit vhodný spouštěcí odpor, kterým se dá libovolně zmenšit záběrný proud a zvětšit záběrný moment až k momentu zvratu. Obvykle se na rotorovou svorkovnici připojuje rotorový spouštěč, tvořený třemi skupinami odporů. Velikost zapojeného odporu se během spouštění postupně zmenšuje, až po skončení rozběhu je v poslední poloze úplně vyřazen a rotorové vinutí se spojí nakrátko (obr. 125a).



Obr. 125. Kroužkový motor: a) schéma, b) průběh spouštění

Rotorový spouštěč musí být konstruován tak, aby nikdy nedošlo k rozpojení rotorového obvodu (oblouk nebezpečné přepětí) a jeho přepínač musí přecházet z jedné polohy do druhé také bez přerušení. Aby při poruše kontaktů přepínače nedošlo k rozpojení rotorového obvodu, jsou všechny tři odpory spojeny nakrátko.

Motory nad 10 kW jsou obvykle vybaveny spojovačem nakrátko jímž se po skončení rozběhu spojí kroužky přímo na stroji nakrátko a tím se vyloučí ztráty v přechodových odporech a přívodním vedení k rotorovému spouštěči. Spojovač nakrátko bývá kombinován a vázán s odklá-



Obr. 126. Spouštění jeřábového motoru

a) schéma zapojení stykačů a odporů, b) tabulka postupu spínání, c) nesouměrné vyřazování spouštěcích odporů

pěčem kartáčů, který po spojení kroužků nakrátko odklopí kartáče, a tak se odstraní ztráty třením a zbytečné opotřebení kartáčů.

Větší motory mají mít podpělovou ochranu, která kroužkový motor vypne při poklesu napětí. Tím ho chrání před proudovým přetížením a před případným proudovým nárazem po obnovení dodávky proudu bez zapojeného spouštěče.

Výhodné je, jsou-li spouštěč a popř. i spojovač nakrátko vybaveny blokovacím kontaktem, který nedovoluje zapnout motor, pokud spouštěč a spojovač nejsou v základní poloze.

Na obr. 126 je schéma zapojení kroužkového jeřábového motoru s nesouměrným vyřazováním spouštěcích odporů pomocí stykačového kontroléru. Nesouměrným spouštěním se při menším počtu spouštěcích stupňů a spínacích kontaktů dosáhne více rozběhových stupňů.

Postup spínání kontaktů udává tabulka, ve které černý bod udává, který kontakt a ve které poloze kontroléra je zapnut.

Pro směr „nahoru“ je stator připojen přes kontakty 1, 3, 5, a pro směr „spouštění“ se reverzace uskutečňuje kontakty 2, 4, 5.

Ve dvou fázích je zapojen koncový vypínač, který vypne motor, dosáhne-li břemeno určité výšky a obsluha sama včas motor nevypne.

Rozběh při zdvihání břemene má devět stupňů a jeho postup je národně vyznačen na obr. 126c. Při spouštění břemene má rozběh jen čtyři stupně. Při zdvihání se motor rozbíhá s rozpojeným stykačem 6, takže rotor pracuje jako jednofázový a má jen malý moment, bez trhání břemenem.

3.16.2. Průběh spouštění

Spouštění můžeme sledovat na obr. 125b v momentových a proudových charakteristikách, které jsou nakresleny pro jednotlivé spouštěcí stupně. Odstupňování spouštěcího odporu musí být takové, aby proud během spouštění kolísal jen mezi dvěma zvolenými nebo předepsanými proudy I_m a I_p .

Moment potom kolísá také mezi dvěma mezními velikostmi M_m a M_p , které v kruhovém diagramu odpovídají proudům I_m a I_p .

Velikost krajního proudu byla předepsána starší normou ČSN 35 3161:

$I_m \leq 0,9I_n$ pro lehký rozběh s polovičním zatížením (1/2),

$I_m \leq 1,8I_n$ pro normální rozběh s plným zatížením (1/1),

$I_m \leq 2,2I_n$ pro těžký rozběh s přetížením (2/1).

Norma ČSN 34 1350 předepisuje maximální přípustný proud

$I_m = 2,5I_n$ pro trvalé zatížení,

$I_m = 3,0I_n$ pro motory s přerušovaným chodem.

Přípustná *nerovnoměrnost spouštění* je

$$g = \frac{I_m}{I_p} < 1,9 \quad (288)$$

3.16.3. Určení spouštěcího odporu

Pro požadovaný proudový náraz I_m je potřebná impedance motoru se spouštěčem

$$Z_s = \frac{U_1}{I_m} \quad (289)$$

a její činná složka

$$R + R_{s1} = \sqrt{Z_s^2 - X^2}$$

takže odpor spouštěče, přepočtený na stator, je

$$R_{s1} = \sqrt{Z_s^2 - X^2} - R \quad (290)$$

Na skutečnou rotorovou velikost se přepočítává vztahem

$$R_s = R_{s1} \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{N_{s2} k_{v2}}{N_{s1} k_{v1}} \right)^2 = R_{s1} \frac{m_2}{U_1} \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 \quad (291)$$

Veličiny R a X známe buď z návrhu motoru, nebo z měření nakrátko.

Odstupňování spouštěcího odporu na jednotlivé stupně, návrh rotorového spouštěče a jeho konstrukce jsou uvedeny ve druhém dílu učebnice.

3.17. ŘÍZENÍ OTÁČEK INDUKČNÍCH MOTORŮ

3.17.1. Základní vztah

Otáčky indukčního motoru jsou dány vztahem

$$n = (1 - s) n_s = (1 - s) \frac{60f}{p} \quad (292)$$

ze kterého vyplývají možnosti řízení:

- změnou kmitočtu,
- změnou skluzu,
- změnou počtu pólů.

3.17.2. Řízení změnou kmitočtu

Změna kmitočtu přichází v úvahu tam, kde potřebujeme zvětšit otáčky motoru nad 3000 min^{-1} (dřevoobráběcí stroje, odstředivky, leštičky apod.). Indukční motor nebo celá skupina motorů se napájí ze zvláštního měniče kmitočtu. Zvýšený kmitočet bývá 100 až 400 Hz.

Dnes se však čím dále tím víc začíná používat indukční motor napájený z elektronického (tranzistorového, tyristorového) statického měniče s plynule říditelným kmitočtem. Říditelný měnič umožňuje zároveň celkem plynulý rozběh motoru, a to vytváří široké možnosti použití jednoduchého indukčního motoru v celkem nových oblastech (např. elektrická trakce).

3.17.3. Řízení změnou skluzu

Podle rovnice (285) je skluz úměrný rotorovému odporu, takže otáčky kroužkového motoru můžeme zmenšovat pod synchronní otáčky zvětšováním odporu rotorového obvodu pomocí regulačního spouštěče dimenzovaného na trvalé zatížení.

Normální spouštěč nemůžeme použít k řízení otáček.

Řízení je nehospodárné, neboť v regulačním odporu vznikají ztráty. Používá se ho jen v krajním případě.

Má-li motor při jmenovitém zatížení a při rotorovém odporu R_2 otáčky n_n , potřebujeme ke zmenšení otáček na n_r (skluz s_r) zařadit do rotorového obvodu regulační odpor R_r podle vztahu

$$\frac{s_n}{s_r} = \frac{R_2}{R_2 + R_r} = \frac{\frac{n_s - n_n}{n_s}}{\frac{n_s - n_r}{n_s}} = \frac{n_s - n_n}{n_s - n_r} \quad (293)$$

Vztah platí jen pro řízení za stálého momentu. Za chodu naprázdno jsou otáčky téměř stejné při jakémkoli odporu v rotoru.

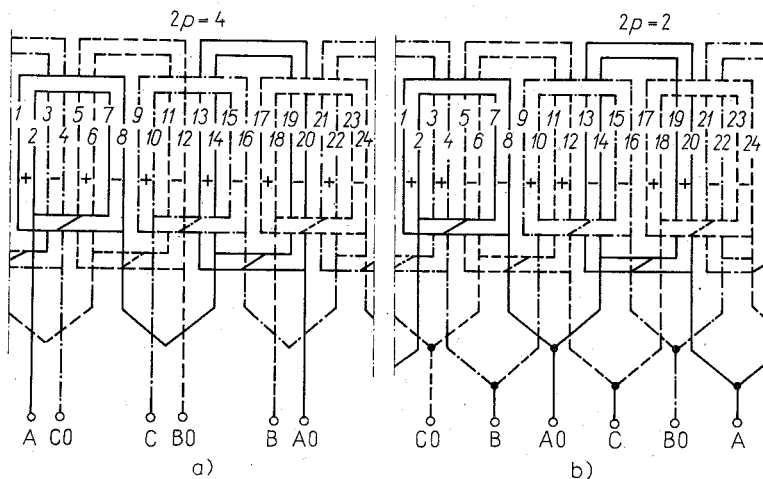
Řízení otáček odporem v rotoru se může používat asi do 50 % synchronních otáček.

3.17.4. Přepínání počtu pólů

Stupňovitě, v hrubých skocích, můžeme měnit otáčky indukčního motoru přepínáním vinutí na různý počet pólů. U kroužkového motoru by se muselo současně přepínat i rotorové vinutí, což by bylo velmi složité.

Nejjednodušší je přepínání počtu pólů pro dvoje otáčky v poměru 1 : 2. Princip přepínání spočívá v tom, že vinutí se zhotoví se *sudým počtem počtem cívkových skupin, které se pro větší počet pólů spojí do série a pro menší počet pólů se spojí paralelně.*

Jednoduché jednovrstvové vinutí se soustřednými cívkami, přepínatelné pro $2p = 2$ a $2p = 4$, je na obr. 127.



Obr. 127. Jednovrstvové vinutí motoru pro dvoje otáčky

Vinutí má $Q = 24$ drážek, cívkové svazky se skládají ze dvou cívek. Střední krok odpovídá většímu počtu pólů, a je tedy

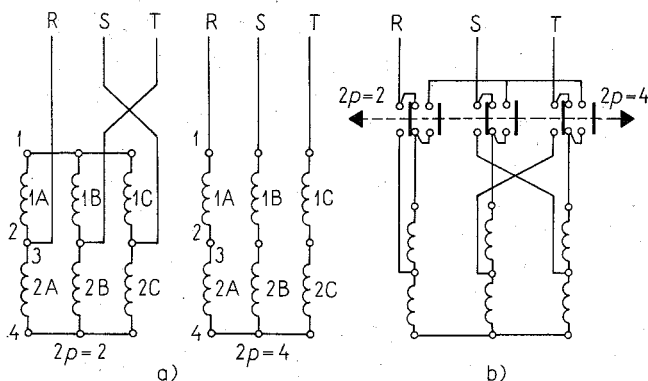
$$y_4 = \frac{Q}{2p} = \frac{24}{4} = 6 \text{ drážkových roztečí}$$

Pro čtyři póly jsou svazky zapojeny do série. Začátky fází musíme posunout o $120^\circ + 360^\circ$ el, tedy o $4 + 12 = 16$ drážek.

Pro dva póly se skupiny cívek spojí paralelně. Začátky fází musí být posunuty o 120° el, tedy o $1/3$ obvodu

$$24/3 = 8 \text{ drážek}$$

Jestliže začátek fáze A je v drážce č. 2, potom $2 + 8 = 10$ a v desáté drážce musí být začátek fáze B. Ale v té je už začátek fáze C čtyřpólového



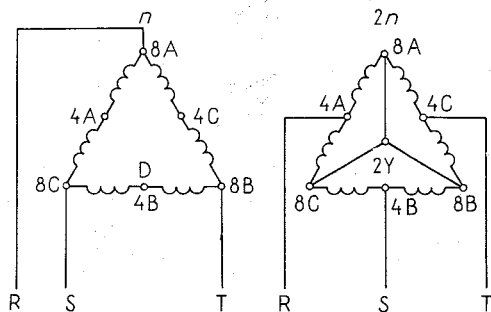
Obr. 128. Přepínatelné vinutí v poměru 1 : 2
 a) schéma přepínání, b) zapojení přepínače

vinutí. Z toho plyne, že pro stejný směr točení (stejný sled fází) je třeba při přepínání přehodit přívody k fázím B a C.

Kdyby se mělo vinutí skutečně přepínat podle schématu na obr. 127, musela by mít svorkovnice motoru až devět svorek a přepínač by byl velmi složitý.

Zjednodušení se dosáhne tak, že na svorkovnici se šesti svorkami se vyvedou jen začátky vinutí (1) a sériové spoje skupin (2 + 3), (obr. 128a), neboť konce vinutí (4) se spojí přímo ve stroji do uzlu. Schéma přepínače je na obr. 128b.

Při popsaném jednovrstvovém vinutí je krok při spojení na menší počet pólů zkrácen na polovinu a vinutí je velmi špatně využito. Průběh magnetomotorického napětí je velmi vzdálen sinusovému průběhu.



Obr. 129. Dahlanderovo zapojení motoru pro dvoje otáčky

Výhodnější je proto dvouvrstvé vinutí, které navrhujeme pro větší počet pólů, jako tzv. vinutí se širokými vrstvami. Jednotlivé fáze budou mít $2q$ drážek a cívky se navrhnou s plným krokem.

Z hlediska lepšího využití dvouotáčkového motoru je výhodnější tzv. Dahlanderovo zapojení podle obr. 129. Pro menší otáčky vinutí je zapojeno do trojúhelníka, pro větší otáčky se jeho vrcholy spojí do uzlu a napájí se středy každé fáze, takže vinutí tvoří dvojitou hvězdu. Tímto zapojením dosáhneme toho, že při menších otáčkách je výkon motoru jen o 20 až 30 % menší než při větších otáčkách.

Normálně se jedno vinutí navrhuje jen pro jedno přepínání v poměru 1 : 2. Můžeme ho však navrhnout i pro poměr 1 : 3, nebo 2 : 3 a při vhodné konstrukci nemusí být motor větší a nákladnější.

Motory pro několik otáček mají dvě vinutí, samostatně přepínatelná v nejvýhodnějším poměru 1 : 2.

Například jedno vinutí pro 4 a 8 pólů, druhé vinutí jen pro 6 pólů, takže motor má troje otáčky, nebo jedno vinutí pro 4 a 8 pólů, druhé vinutí pro 6 a 12 pólů a motor má potom až čtvery otáčky.

3.18. INDUKČNÍ GENERÁTOR A BRZDA

3.18.1. Indukční generátor

Na obr. 130 je úplný kruhový diagram indukčního stroje. Motoru, který pracuje v oblasti skluzu 0 až 1, odpovídá část kružnice mezi body $A_0 - A_k$.

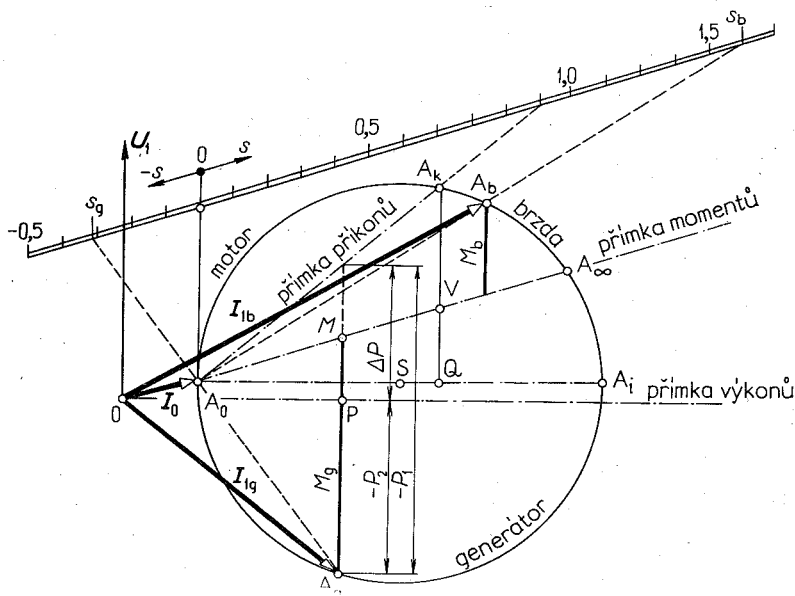
Zvětšíme-li vnějším momentem otáčky motoru nad synchronní otáčky, je $n > n_s$ a skluz vychází záporný

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} < 0$$

Zápornému skluzu 0 až $-\infty$ odpovídá spodní část kružnice mezi body A_0 až A_∞ . Určitým nadsynchronním otáčkám (skluz s_g) odpovídá na kružnici zatěžovací bod A_g a statorový proud I_{1g} . Jeho činná složka, úměrná výkonu $I_{1g} \cos \varphi_1$, je záporná, takže indukční stroj se stal generátorem a dodává do sítě činný výkon úměrný úsečce $\overline{A_g P}$.

Jalová složka proudu zůstává kladná, indukční generátor jalový výkon sám nevyrabí, ale odebírá ho ze sítě, do které pracuje.

Velikost proudu, který dodává indukční generátor do sítě, a jeho účinnost jsou určeny otáčkami (skluzem) a ne požadavkem sítě. Vhodný je proto pro paralelní spolupráci, např. se synchronními generátory, které dodávají spotřebičům a samotnému generátoru magnetizační proud. Indukční generátor dodává do společné sítě jen část činného výkonu podle velikosti mechanické energie, kterou má k dispozici.



Obr. 130. Úplný kruhový diagram indukčního stroje

Indukční generátor se s výhodou používá v automatických vodních elektrárnách, které pracují bez obsluhy. Výkon turbíny představuje příkon generátoru P_1 , který z části kryje ztráty ΔP a jeho zbytek tvoří výkon dodávaný do sítě P_2 (obr. 130).

Výhodou indukčního generátoru je především jeho jednoduchost (klecový rotor). Pracuje bez sběracích kroužků a nepotřebuje budič ani nákladný rychloregulátor.

Samostatně, bez paralelní spolupráce se synchronním generátorem, může indukční generátor pracovat jen tehdy, spojí-li se paralelně s kondenzátory, které dodávají jalový proud síti i generátoru. Jejich pomocí lze řídit i napětí.

3.18.2. Indukční brzda

Otáčí-li se rotor indukčního motoru připojeného k síti proti směru otáčení točivého magnetického pole (klesajícím břemenem, výtahovou klecí, brzděnou hoblovkou apod.), jeho otáčky n_b jsou záporné a skluz je větší než jedna

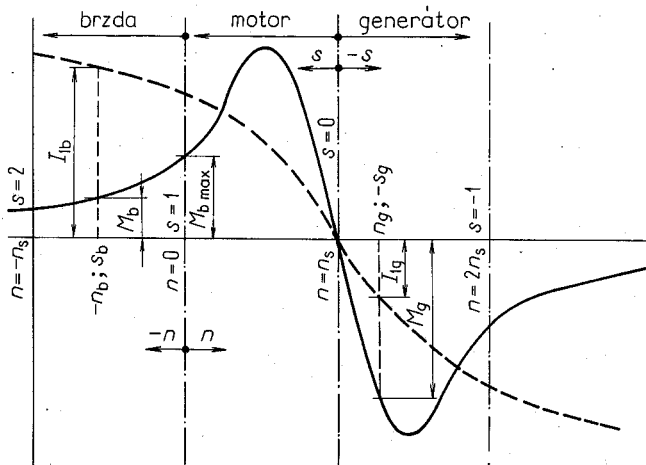
$$s = \frac{n_s - (-n_b)}{n_s} = \frac{n_s + n_b}{n_s} > 1$$

Zatěžovací bod A_b se v kruhovém diagramu (obr. 130) posune za bod A_k a motor pracuje jako indukční brzda s brzdícím momentem M_b .

Indukční brzdě odpovídá v kruhovém diagramu část mezi body A_k ($s = 1$) a A_∞ ($s \rightarrow \infty$).

Během brzdění odebírá motor ze sítě proud I_{1b} , který je značně větší než proud nakrátko I_{1k} , a motor je jím velmi namáhán.

Úplnému kruhovému diagramu odpovídá momentová charakteristika na obr. 131.



Obr. 131. Úplná momentová charakteristika indukčního stroje

Brzdění momentem točivého magnetického pole se nazývá *brzdění protiproudem*. Protiproudem se brzdí tak, že v okamžiku brzdění se změní směr točení magnetického pole přepólováním dvou přívodů. Rotor se setrvačností otáčí dále původním směrem a je přitom brzděn momentem,

který odpovídá skluzu $s \doteq 2$; ($n \doteq -n_s$), obr. 131. S klesajícími otáčkami brzdňý moment vzrůstá až na záběrný moment v okamžiku úplného zastavení. Jestliže není motor včas odpojen od sítě, roztočí se po zastavení opačným směrem.

U kroužkového motoru můžeme velikost brzdňého momentu libovolně zvětšit až na moment zvratu zařazením vhodného odporu do rotorového obvodu. Změkčit brzdění a prodloužit brzdňý čas lze přepojením motoru z trojúhelníka do hvězdy, již odpovídá třetinový brzdňý moment.

Brzděním protiproudem můžeme i velké hmotnosti zabrzdít v nejkratším čase (i za 0,1 s).

Proti zpětnému roztočení po zabrzdění je motor chráněn pomocným spínačem ALNICO, který se montuje na hřidel chráněného motoru.

V některých případech můžeme k brzdění využít generátorického chodu motoru při jeho nadsynchronních otáčkách. Jde potom o tzv. *nadsynchronní brzdění*. Využívá se např. u jeřábů a výtahů. Klesající břemeno otáčení motorem nadsynchronními otáčkami, motor pracuje jako indukční generátor, vrací energii do sítě a tím se přibrzdjuje.

3.19. JEDNOFÁZOVÝ INDUKČNÍ MOTOR

3.19.1. Princip a vlastnosti

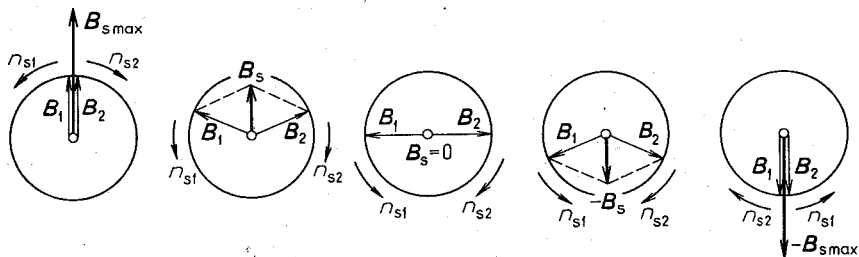
Používá se k pohonu malých spotřebičů, které umožňují mechanizovat mnoho různých prací v domácnosti (pračky, chladničky, kuchyňské roboty, ventilátory, odstředivky apod.).

Stator jednofázového motoru je drážkovaný a má jednofázové vinutí; rotor má obvykle klecové vinutí.

Jednofázový indukční motor se po připojení k síti nerozběhne, neboť jeho jednofázové vinutí, napájené jednofázovým napětím, vyvolá jen pulsující střídavé magnetické pole, které nezpůsobí točivý moment.

Aby se jednofázový motor začal otáčet, je třeba ho nějakým způsobem roztočit alespoň na 20 % synchronních otáček.

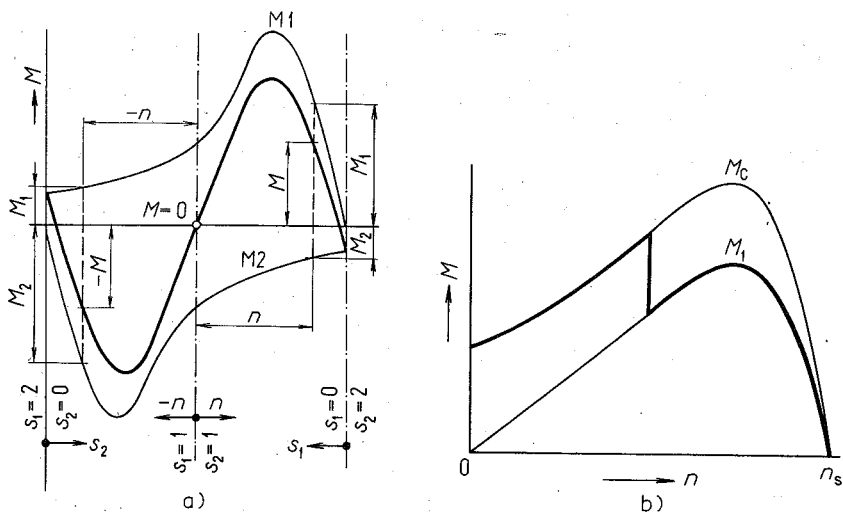
První harmonickou stojatého střídavého magnetického pole můžeme nahradit stejnými točivými poli, která se otáčejí proti sobě. Okamžitá hodnota magnetické indukce stojatého pole B_s je dána vektorovým součtem magnetických indukcí obou točivých magnetických polí (obr. 132).



Obr. 132. Náhrada stojatého magnetického pole dvěma točivými protiběžnými magnetickými poli

Stojícímu rotoru odpovídá pro obě točivá pole skruz $s = 1$. Kdyby se rotor otáčel synchronními otáčkami např. ve směru točivého magnetického pole 1, měl by proti němu skruz $s = 2$ ($n = -n_s$) a naopak. Označíme-li moment prvního točivého magnetického pole za kladný, je moment druhého točivého pole záporný a momentové charakteristiky obou polí mají průběh podle obr. 133a.

Pokud rotor stojí, jsou oba momenty stejné a opačné, takže záběrný moment je nulový. V tyčích stojícího rotoru se transformačním účinkem indukuje velký zkratový proud.



Obr. 133. Momentová charakteristika jednofázového indukčního motoru
a) bez rozběhového opatření, b) s kapacitním rozběhem

Jestliže se však jakýmkoli způsobem rotor roztočí, např. na otáčky n (obr. 133a), moment M_1 je větší než moment M_2 a rotor se začne otáčet působením rozdílu obou momentů. Po roztočení opačným směrem ($-n$) je výsledný moment stejně velký, ale opačný a rotor se bude otáčet opačně.

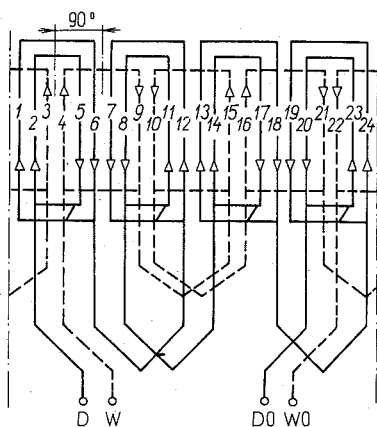
Výsledná momentová charakteristika je dána součtem obou charakteristik M_1 a M_2 .

Pro oba směry je tato charakteristika stejná, takže jednofázový indukční motor pracuje stejně v obou směrech, podle toho, na kterou stranu se roztočí. Z průběhu charakteristiky je vidět, že rotor nemůže dosáhnout nikdy synchronních otáček, neboť při nich je jeho moment záporný.

Pro roztočení jednofázového indukčního motoru můžeme použít jakéhokoli způsobu, třeba i roztočení rukou (zatahnutím za řemen, klikou apod.).

Dnes se jednofázové motory dělají výhradně s pomocným rozběhovým vinutím a rozbíhají se jako dvoufázové. Rozběhové vinutí se navrhne tak, aby bylo proti hlavnímu vinutí posunuto o 90° el. Vinutí se navrhuje jako trojfázové. Cívky dvou fází se spojí do série a vytvoří hlavní fázi, drážky třetí fáze se využijí pro uložení rozběhového vinutí.

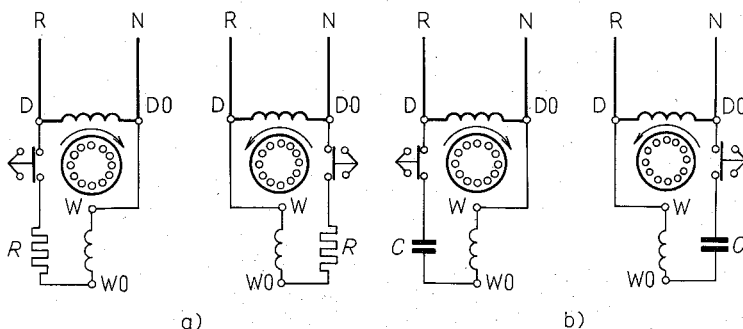
Na obr. 134 je schéma nejčastějšího jednovrstvého jednofázového vinutí se soustřednými cívkami. Všechny cívky jsou zapojeny do série tak, aby výsledné magnetické pole bylo čtyřpólové. Pro poloviční napětí se cívky zapojí paralelně, ale tak, aby smysly proudů ve vodičích zůstaly nezměněny.



Obr. 134. Nejjednodušší jednofázové vinutí se soustřednými cívkami a pomocnou rozběhovou fází

Pomocná fáze ($W - W_0$ *) se připojí paralelně k hlavní fázi. ($D - D_0$) a potřebný fázový posun je dán rozdílnými elektrickými vlastnostmi obou paralelních větví. Obvykle bývá menší než 90° , takže vzniklé točivé pole není kruhové, ale jen eliptické. K rozběhu motoru však stačí.

Aby vznikl fázový posun, tak se do série s pomocným vinutím zapojuje činný odpor (odporový rozběh – obr. 135a) nebo kondenzátor (kapacitní rozběh – obr. 135b).



Obr. 135. Zapojení jednofázového indukčního motoru
a) s odporovým rozběhem, b) s kapacitním rozběhem

Předřadný odpor R se obvykle nahrazuje přímo zvětšením odporu pomocného vinutí (odporová fáze). Zvětšení odporu dosáhneme použitím mosazného vodiče nebo větším počtem závitů, z nichž poslední jsou navinuty v opačném směru, aby buzení cívky zůstalo nezměněno. Samotné zmenšení průřezu není vhodné, neboť znamená zmenšení tepelné kapacity vinutí.

Při převíjení pomocného vinutí a nedostatku původního mosazného vodiče lze vinutí zhotovit z měděného vodiče stejného průřezu. Potřebného odporu lze dosáhnout předřazeným odporem, zařazeným na svorkovnici motoru.

Rozběhové vinutí je dimenzováno jen na krátkodobé zatížení a musí se po skončeném rozběhu odpojit. Vinutí můžeme odpojit trojpolohovým přepínačem, který v první poloze zapíná obě fáze a v druhé poloze, do které se přepne po rozběhu, pomocnou fázi odpojuje. V poslední poloze motor stojí.

*) Pozn. red.: Podle nové ČSN 34 0160 z roku 1976 se svorky jednofázového motoru značí podle tab. 3 na str. 63.

Kdybychom přepínač ponechali trvale v první poloze, poškodilo by se rozběhové vinutí. Kdyby se rychle přepnul do druhé polohy, motor by se nestačil rozběhnout a poškodilo by se hlavní vinutí.

Výhodnější je použití odstředivého vypínače, namontovaného přímo na hřídel motoru. Tam, kde není možné umístit odstředivý vypínač, používají se k odpojení rozběhového vinutí různá relé, nejčastěji časová.

K dosažení lepšího a tiššího rozběhu (jednofázový motor při eliptickém magnetickém poli hlučí během rozběhu) a tam, kde pro dosažení potřebného záběrného momentu odporový způsob rozběhu nestačí, zapojujeme do obvodu rozběhového vinutí kondenzátor. Bývá to lehký a malý bipolární elektrolytický kondenzátor, dimenzovaný na krátkodobé zatížení. Na něm je i údaj o hustotě spouštění, kterou je schopen vydržet.

Rozběhovým kondenzátorem můžeme dosáhnout až čtyřnásobného záběrného momentu při zmenšeném záběrném proudu (obr. 133b). Proto je zvláště vhodný pro pohon kompresorových chladniček, které při rozběhu vyžadují velký záběrný moment.

Zlepšení účinku a požadovaný průběh momentové charakteristiky můžeme dosáhnout trvale zapojeným kondenzátorem v obvodu rozběhového vinutí (kapacitní motor). Jeho velikost musíme volit tak, aby kapacitní proud vyhovoval danému průřezu rozběhového vinutí. K rozběhu můžeme použít dalšího kondenzátoru, dimenzovaného na krátkodobé zatížení.

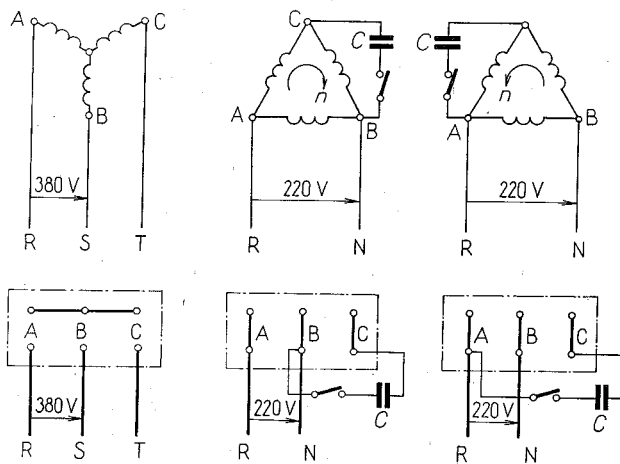
Pro určení *minimální kapacity rozběhového kondenzátoru* se udává empirická rovnice

$$C = 68P \quad [\mu\text{F}; \text{kW}] \quad (294)$$

Výkon jednofázového indukčního motoru ve srovnání se stejně velkým trojfázovým motorem je asi o 50 % menší. Podle ČSN 34 1350 můžeme na síť nízkého napětí připojovat jednofázové motory do výkonu 0,5 kW, náraz při spouštění nesmí překročit 7 kVA.

Trojfázový indukční motor po náhodném odpojení jedné fáze (přetavení pojistky) pracuje dál jako jednofázový motor se značně zmenšeným výkonem, který je vzhledem k původnímu výkonu asi třetinový. Jestliže se dále zatěžuje původním momentem, může se při nepozorné obsluze poškodit. Proto jsou motory vybavovány ochranou proti chodu na jednu fázi. Po zastavení se motor na jednu fázi nerozběhne a jestliže se včas neodpojí, jeho vinutí se poškodí.

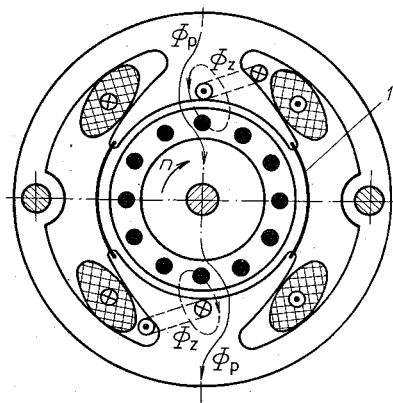
Poznámka. V případě potřeby můžeme k jednofázové síti připojit každý menší trojfázový motor několika způsoby. Na obr. 136 je uveden osvědčený způsob, použitelný pro motory na napětí 380/320 V – Y/D.



Obr. 136. Připojení malého trojfázového motoru k jednofázové síti

3.19.2. Jednofázový indukční motor se stíněnými póly

Velmi malé motorky na jednofázový proud mají stator s vyjádřenými póly, složenými z dynamových plechů. Na pólech je kromě budícího vinutí umístěn ve vhodném zářezu měděný závit spojený nakrátko (obr. 137).



Obr. 137. Jednofázový indukční motor se stíněnými póly
1 – magnetické plíšky

Část hlavního magnetického toku Φ_p prochází plochou závitů a indukuje v něm proud posunutý asi o čtvrtinu kmitu za tímto tokem. Tok Φ_z způsobený tímto proudem se geometricky sečte s tokem Φ_p a vychyluje ho na jednu stranu, což stačí k roztočení nezátženého motorku. Rotor má normální měděnou nebo hliníkovou klec.

Lepešího záběru dosáhneme stíněním pólu dvěma závitů a magnetickými plíšky, vloženými mezi okraje pólových nástavců.

Motor se stíněnými póly se používá k pohonu gramofonů, ventilátorů, šlehačů apod. Tichý chod a jednoduchá konstrukce vyvažují zhoršenou účinnost, způsobenou trvalým zahříváním závitů nakrátko.

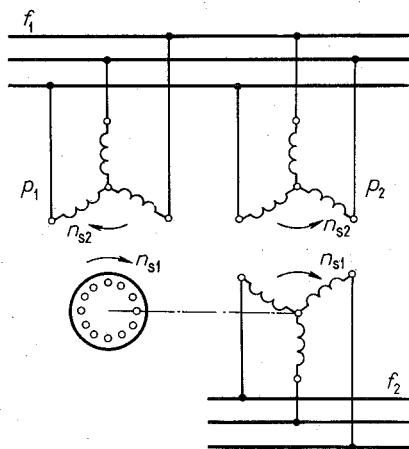
3.20. INDUKČNÍ MĚNIČ KMITOČTU

Indukční měnič kmitočtu se používá k *napájení indukčních motorů s velkými otáčkami*, které slouží pro pohon dřevoobráběcích strojů, leštiček, odstředivek apod.

Skládá se z normálního kroužkového motoru, jehož rotorem obvykle otáčí indukční motor s kotvou nakrátko. Statorové vinutí je zapojeno tak, že jeho točivé magnetické pole obíhá proti směru otáčení rotoru (obr. 138).

Má-li pohonný motor $2p_1$ pólů a je-li zapojen k síti o kmitočtu f_1 , jsou jeho otáčky při zanedbání skluzu dány vztahem

$$n_{s1} = \frac{60f_1}{p_1}$$



Obr. 138. Indukční měnič kmitočtu

Otáčky točivého magnetického pole generátoru, který má $2p_2$ pólů a je napájen ze stejné sítě, jsou

$$n_{s2} = \frac{60f_1}{p_2}$$

Skluзовý kmitočet napětí indukovaného v rotorovém vinutí generátoru je úměrný součtu obojích otáček

$$\begin{aligned} f_2 &= \frac{p_2}{60} (n_{s2} + n_{s1}) = \frac{p_2}{60} \left(\frac{60f_1}{p_2} + \frac{60f_1}{p_1} \right) = \\ &= f_1 \left(\frac{p_2}{p_2} + \frac{p_2}{p_1} \right) = f_1 \left(1 + \frac{p_2}{p_1} \right) \end{aligned} \quad (295)$$

3.21. PROVEDENÍ INDUKČNÍCH STROJŮ

Provedení indukčních strojů i elektrických točivých strojů vůbec rozlišujeme podle

1. krytí,
2. chlazení,
3. tvaru.

Krytí, udávané dvojcíslem za všeobecnou značkou IP, bylo už uvedeno v čl. 1.9, tab. 1.

Chlazení může být v zásadě

1. vlastní – ventilátorem nasazeným na hřídeli stroje,
2. cizí – ventilátorem, poháněným cizím motorem; je potřebné u regulovatelných strojů k zabezpečení dostatečného chlazení i při nejnižších otáčkách.

Způsob chlazení se udává písmenovou značkou za znakem krytí podle čl. 1.9.

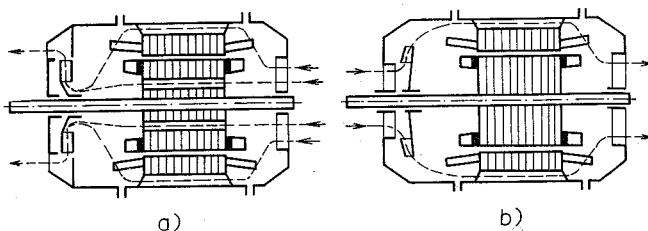
Podle směru vzduchového proudu se rozlišuje chlazení

1. axiální – vzduch proudí ve směrech rovnoběžných s osou stroje,
2. radiální – vzduch proudí ve směrech kolmých k ose stroje.

Podle uspořádání ventilátorů ve stroji (obr. 139) je chlazení

1. nasávací – vzduch se nasává ze stroje a vyfukuje se do prostředí,
2. tlačné – vzduch se nasává z prostředí a protlačuje se chlazeným strojem.

Z obr. 139 je vidět, že u nasávacího chlazení je lépe chlazen rotor, takže tento způsob vyhovuje pro dlouhé stroje s menším průměrem. U tlačného způsobu je naopak lépe chlazen stator, takže tento způsob vyhovuje krátkým strojům s větším průměrem. Výhoda nasávacího větrání spočívá v tom, že odsává ze stroje prach a nečistoty. Používá se ho s výhodou u kroužkových motorů.



Obr. 139. Chlazení točivého stroje
a) nasávací, b) tlačné

Podle počtu ventilátorů může být chlazení

1. jednostranné,
2. dvoustranné.

Aby chlazení bylo účinné, musí se chladicí vzduch vést těsně podél těch částí, které jsou jím chlazeny (hřbet statorových plechů, čela vinutí). Tento požadavek ovlivňuje tvar kostry a ložiskových štítů. Může se zajistit i vhodně upravenými plechovými štíty.

Tvary elektrických strojů točivých určuje ČSN 35 0002, platná od r. 1966.

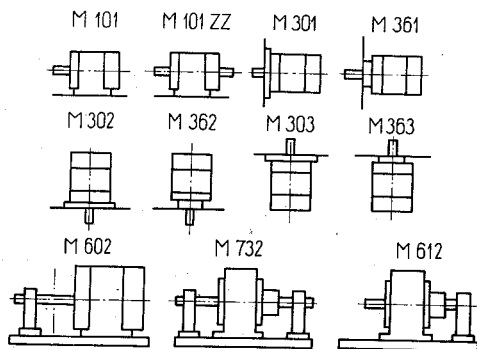
Označení tvaru se udává značkou např. M 123 K, kde jednotlivé symboly označují

- M všeobecný znak tvaru stroje
 - 1 skupinové číslo tvaru stroje
 - 2 konstrukční číslo tvaru stroje
 - 3 číslo polohy
 - K označení pro kuželový hřídel
- Znaky pro skupiny strojů

- M 1 stroje patkové a závěsné s ložiskovými štíty
- M 2 stroje patkopřírubové s ložiskovými štíty
- M 3 stroje přírubové, s přírubou na ložiskovém štítu
- M 4 stroje s přírubou na kostře a s ložiskovými štíty

- M 5 stroje vestavné a přístavné
- M 6 stroje s ložiskovými štíty a se stojany
- M 7 stroje s ložiskovými stojany
- M 8 velké svislé stroje

Konstrukční čísla a čísla položek jsou přehledně uvedena v normě. Běžně vyráběné motory mají tvar podle obr. 140.



Obr. 140. Nejběžnější tvary točivých strojů

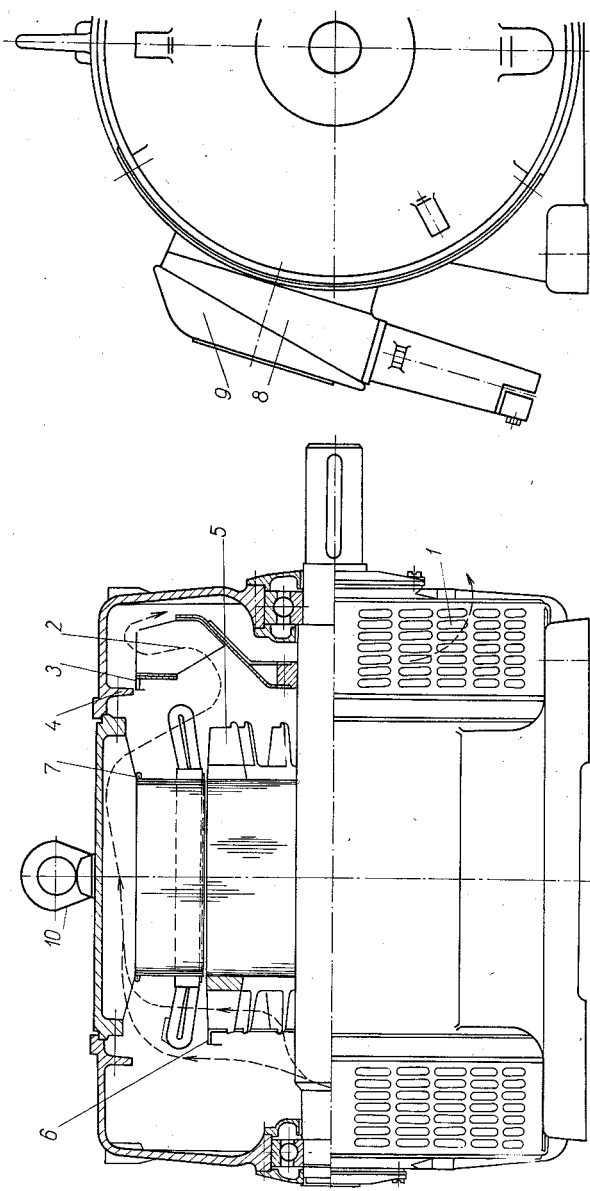
3.22. KONSTRUKCE MOTORŮ S KOTVOU NAKRÁTKO

3.22.1. Otevřený motor středního výkonu

Na obr. 141 je motor s kotvou nakrátko, 28 kW, $2p = 4$, provedení IP 21/b, tvar M 101, z dřívější národní řady motorů, která se už přestala vyrábět. Řada byla konstruována tak, že ze stejných základních částí bylo možné skládat motory různého provedení. Je příkladem toho, jak při dnešním bouřlivém rozvoji techniky nedokáže typizace a standardizace vždy zajistit potřebnou pružnost a pohotovost při přizpůsobení se poměrům na světovém trhu.

Protože má motor krytí IP 21/b, jsou ventilační otvory jen ve spodní části ložiskových štítů a proti vnikání cizích předmětů jsou tyto otvory chráněny děrovaným plechem 1. Motor má vlastní nasávací větrání. Ventilátor 2 je zhotoven z tenkého plechu a prostřednictvím masivního náboje je nasazen na vroubkovanou část hřídele.

Chladicí vzduch se nasává otvory v předním ložiskovém štítu a proudí kolem čel statorového vinutí, ochlazuje hřbet statorových plechů a otvory v zadním ložiskovém štítu opouští motor.



Obr. 141. Trojfázový indukční motor s kotvou nakrátko, 28 kW, 2p = 4, IP 21/b, M 101, MEZ Vývojový závod Brno
 1 – plechový kryt ventiláčnických otvorů, 2 – plechový ventilátor, 3 – stínící plech ventilátoru, 4 – těsnicí náliček na ložiskovém štítu,
 5 – ventiláčnickí lopatky hliníkové klece, 6 – vyvažovací kruh, 7 – statorové stahovací spony, 8 – statorová svorkovnice,
 9 – kryt svorkovnice, 10 – zdvihací oko

Vzduch se má nasávat na přední straně motoru, aby se s ním do motoru nedostával prach, který se víří kolem řemenice.

Ventilátor má plechové těsnění 3, které umožňuje správné vedení vzduchu a spolu s nálitkem 4 na ložiskovém štítu vytváří prostor, ve kterém se chladicí vzduch shromažďuje a vede k vyfukovacím otvorům. K chlazení přispívají i lopatky klece 5, která víří vzduch pod čely statorového vinutí. K lopatkám je připevněn vyvažovací kruh 6.

Statorová kostra a ložiskové štíty jsou litinové. Litinové díly jsou při sériové výrobě technologicky výhodnější.

Svařované konstrukce jsou vhodné při kusové výrobě, kde by výroba nákladných forem a modelů byla neekonomická.

Statorové plechy jsou samostatně staženy plechovými sponami 7 a celý svazek je po navinutí nalisován na žebra statorové kostry.

Rotor je stažen jen klecí a nalisován na vroubkovaný hřídel.

Přední ložisko je posuvné, zadní pevné, stažené na obou stranách víky ložiskového pouzdra.

Na náliček v kostře statoru je připevněno litinové těleso statorové svorkovnice 8, které je zakryto plechovým krytem 9. Základní umístění svorkovnice je po pravé straně při pohledu na motor ze strany pohonu. V případě potřeby se může umístit i na druhou stranu tak, že stator se v motoru otočí. Umožňuje to jeho souměrnost podle svislé osy.

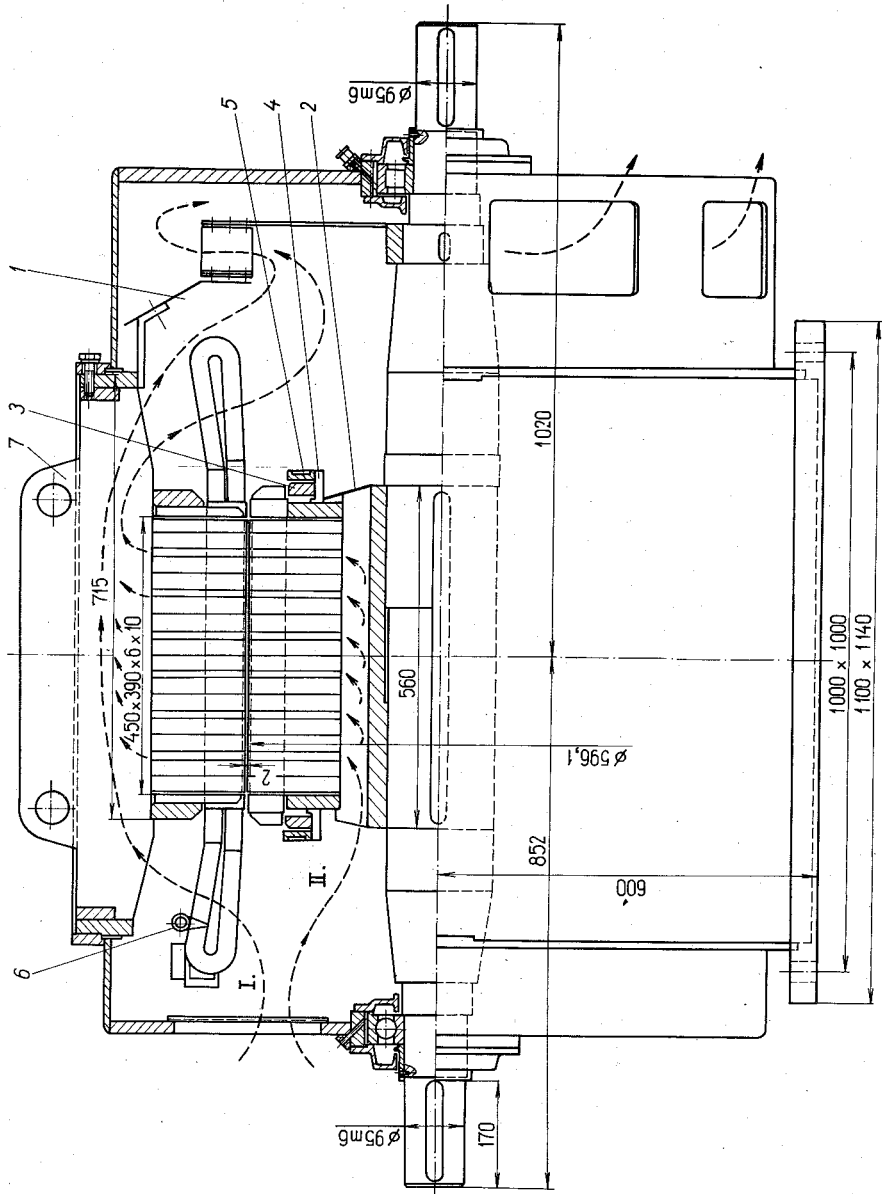
V horním žeburu statorové kostry je otvor se závitem, do něhož je zašroubováno závěsné oko 10.

Pro vyloučení případného chvění rotoru je uspořádání lopatek klece po obou stranách různé.

3.22.2. Otevřený motor s vírovou kotvou a svařovanou konstrukcí

Motor na obr. 142 má opět nasávací větrání. Ventilátor tvoří plechový kruh s přinýtovanými lopatkami, přivařený na válcový náboj. S hřídelem je spojen perem a pojištěn šroubem.

Vzduch se nasává mřížovaným otvorem v čelní stěně předního ložiskového štítu a rozděluje se na proud statorový I a proud rotorový II. Rotorový proud musí přestupovat radiálními ventilačními kanály v rotorovém svazku do vzduchové mezery a jeho část dále statorovými kanály až na vnější obvod statorových plechů. Odtud spolu se statorovým proudem



Obr. 142. Trojfázový indukční motor s vírovou kotvou (ČKD Praha, n. p.)
 1 – statorová hradící stěna, 2 – rotorová hradící stěna, 3 – spojovací kruh vírové klece, 4 – podpěra spojovacího kruhu,
 5 – vyvažovací kruh, 6 – výztuha statorových čel, 7 – žebro se zdvihacími oky

přichází k náběhové hraně ventilátoru, k níž je veden plechovým mezikružím 1. Přímému přechodu rotorového proudu vzduchu mezi žebry rotorové hvězdy brání plechová zástěra 2. Z ventilátoru je vzduch vyfukován otvory ve spodní části zadního ložiskového štítu.

V rotorových drážkách jsou uloženy vysoké měděné izolované tyče, připájené k masívním spojovacím kruhům 3. Aby byla umožněna tepelná dilatace vysokých tyčí, jsou připevněny ke kruhům jen na jejich spodní části. Spojovací kruhy jsou z mechanických důvodů nesené podpěrami 4, na nichž jsou současně po obou stranách rotoru připevněny vyvažovací kruhy 5.

3.23. KONSTRUKCE KROUŽKOVÝCH MOTORŮ

2.23.1. Otevřený kroužkový motor středního výkonu

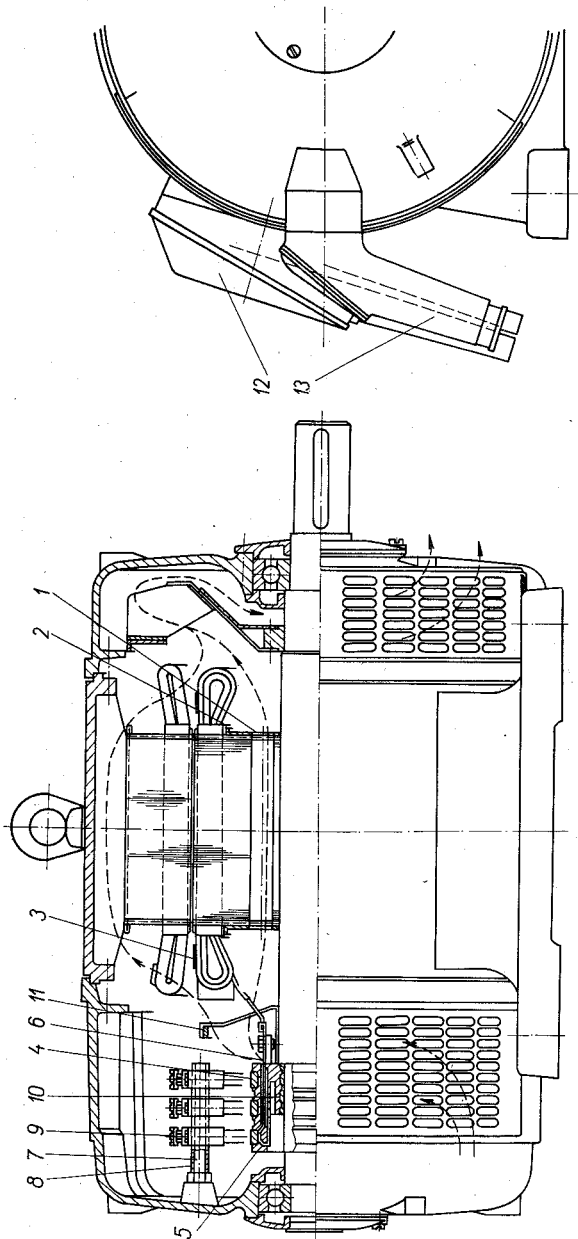
Na obr. 143 je otevřený kroužkový motor o výkonu 28 kW, odvozený z indukčního motoru bývalé národní řady z obr. 141. Má s ním společný stator, kostru, zadní ložiskový štít a ventilátor. Vyměněn je jen rotor, hřídel a přední ložiskový štít, který vzhledem ke kroužkům musí být prostornější. Uspořádání statoru a větrání je stejné.

Rotor je snýtován mezi dvě postranice 1 z lisovaného plechu a nalisován na vroubkovanou hřídel. Postranice mají vyhnutý okraj, který slouží k částečnému podepření vinutí, podloženého lepenkou 2. Proti odstředivé síle jsou čela rotorového vinutí vyztužena bandáží 3 z ocelového drátu.

Rotorové vinutí je dvouvrstvové, spojené do hvězdy a vyvedené na tři sběrací kroužky 4 z fosforového bronzu nebo z tvrdé mědi, zalisované do pouzdra 5 z lisovaného izolantu. V izolantu jsou zalisovány tři ploché mosazné pásky 6, pootočené o jednu třetinu obvodu a připájené po jednom na každý kroužek. Slouží pro připojení vývodů vinutí.

Lisované pouzdro sběracích kroužků do průměru 100 mm se natáhne na vroubkovaný hřídel, u větších průměrů má drážku pro pero. Může být přitom nalisováno na ocelovém náboji 10.

Nad sběracími kroužky je v ložiskovém štítu zašroubován ocelový nosič kartáčových držáků 7, izolovaný trubkou 8, na němž jsou upevněny tři držáky kartáčů 9, jimiž jsou na sběrací kartáče přitlačované uhlíkové kartáče. Držáky mohou být jednoduché nebo dvojité. Držáky kartáčů



Obr. 143. Kroužkový motor 28 kW, $2p = 4$, tvar M 101, odvozený z motoru s kotvou nakrátko podle obr. 140

- 1 – postranice rotoru, 2 – izolační vypořádání čel, 3 – bandáž rotorových čel, 4 – kroužky,
- 5 – pouzdro z lisovaného izolantu, 6 – přípojovací pás, 7 – svorník pro držáky kartáčů,
- 8 – držák kartáčů, 9 – ocelový náboj pouzdra, 10 – vyvažovací kotouč, 11 – statorová svorkovnice, 12 – rotorová svorkovnice

jsou vodivě spojeny se třemi svorkami rotorové svorkovnice 13, upravené na předním ložiskovém štítu.

Přístup ke sběracímu mechanismu je umožněn odmontováním děrovaného plechu na předním ložiskovém štítu.

Vyvažovací kotouč 11 je umístěn mezi sběracími kroužky a rotorem.

3.23.2. Velký kroužkový motor s odklápěčem kartáčů

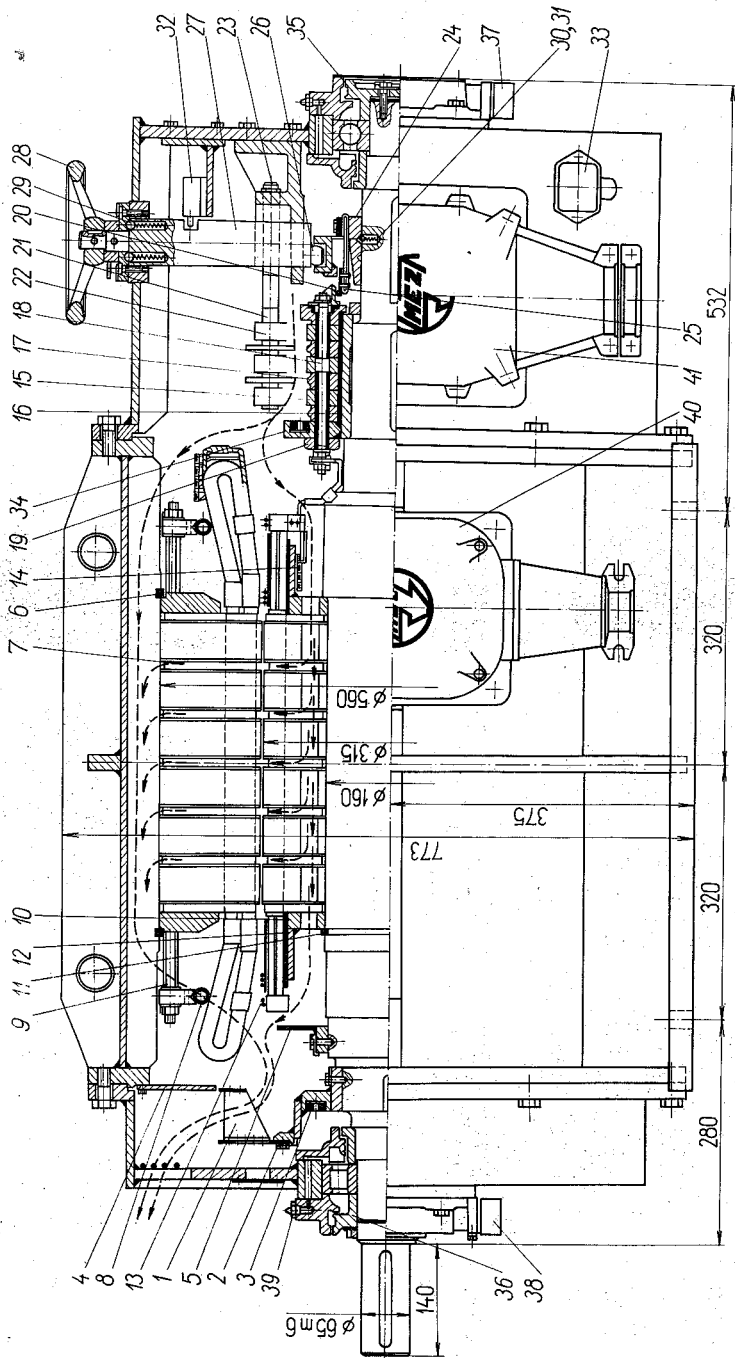
Na obr. 144 je moderní konstrukce kroužkového motoru n. p. MEZ Vsetín.

Má jednostranné nasávací větrání, které zajišťuje ventilátor 1 snýtovaný z tenkého plechu a přišroubovaný na svařovaný nosič 2. V nosiči je vysoustružena lichoběžníková drážka, do níž se upevňují vyvažovací tělíska 3. Rotorový vzduchový proud se z axiálních kanálů v rotorovém svazku dostává radiálními kanály do vzduchové mezery a částečně přes statorové ventilační kanály na obvod statorových plechů. Statorový proud ochlazuje čela statorového vinutí a hřbet statorových plechů. Vedení obou proudů k náběhové hraně ventilátoru zajišťuje plechová hradicí stěna 4 a správné rozdělení nasávaného vzduchu na oba proudy se nastaví polohou rotorové hradicí stěny 5. Ventilátor vyfukuje vzduch otvory v zadním štítu, které jsou chráněny drátěnými kruhy před vniknutím cizích předmětů.

Motor je vybaven odklápěčem kartáčů a spojovačem nakrátko. Po rozběhu motoru jsou kroužky spojeny objímkou 24, která má pružný kruhový kontakt 25. V nakreslené poloze spojuje tento kontakt všechny tři kontakty 20 nakrátko.

Obr. 144. Kroužkový motor s odklápěčem kartáčů (MEZ Vsetín, n. p.)

1 – ventilátor, 2 – nosič ventilátoru, 3 – vyvažovací tělísko, 4 – statorová hradicí stěna, 5 – rotorová hradicí stěna, 6 – pero statorové postranice, 7 – ventilační rozpěrky, 8 – opěrný kruh, 9 – nosič opěrného kruhu, 10 – rotorové postranice, 11 – pojistný kroužek, 12 – podpěrný kruh, 13 – bandáž, 14 – spojky rotorového vinutí, 15 – kroužky, 16 – pouzdro kroužků, 17 – izolační vložka, 18 – stahovací svorník, 19 – izolační trubka, 20 – pevný kontakt spojovače, 21 – svorník držáku kartáčů, 22 – dvojitý držák kartáčů, 23 – konzola, 24 – objímka spojovače, 25 – pohyblivý kontakt spojovače, 26 – excentrický čep spojovače, 27 – hřídel spojovače, 28 – ovládací kolečko, 29 – aretační pružina ručního kolečka, 30 – aretační pružina objímky, 31 – aretační kulička, 32 – blokovací přepínač, 33 – svorkovnice blokovacího přepínače, 34 – vyvažovací kotouč, 35 – přední odstříkovací kroužek, 36 – zadní odstříkovací kroužek, 37, 38 – odpadové mísky, 39 – maznice, 40 – statorová svornice, 41 – rotorová svornice

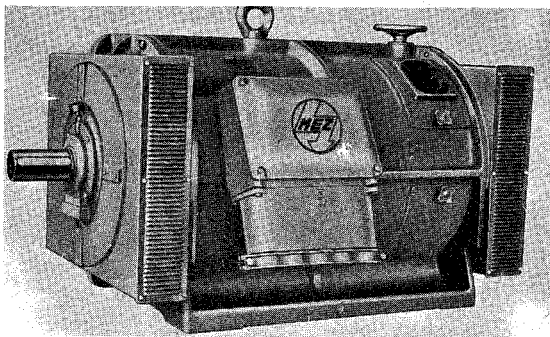


Objímka je ovládána excentrickým čepem 26 na hřídeli 27, kterým otáčí kolečko spojovače 28. Obě krajní polohy ovládacího kolečka jsou jištěny aretačními pružinami 29 a poloha objímky na hřídeli je udržována pružinou 30 s aretační kuličkou 31.

Se spojovačem nakrátko je mechanicky vázán odklápeč kartáčů, který není pro přehlednost v obr. 144 nakreslen.

Blokování proti zapnutí motoru se spojenými kroužky do krátka a odklopenými kartáči zabezpečuje blokovací přepínač 32 vyvedený na svorkovnici 33.

Sběrací kroužky jsou vyvažovány pomocí kotouče 34, který je přivařen k pouzdru 16.



Obr. 145. Trojfázový
indukční motor kroužkový
AB 114-6, 250 kW,
970 min⁻¹, IP 23/b, M 101

Ložiska jsou uložena v ocelových pouzdrech přivařených k oběma ložiskovým štítům. Uzavřena jsou víky s labyrintovým těsněním. K těsnění přispívají i odšťikovací kroužky 35 a 36. Mazací tuk, který unikne z pouzdra, se shromažďuje v odpadových miskách 37 a 38. K přimazávání slouží maznice 39.

Ukázka kroužkového motoru současné čs. konstrukce je na obr. 145.

3.24. ZAVŘENÉ MOTORY

3.24.1. Všeobecně

Zavřené motory byly původně určeny pro provoz v prašných prostorách. Dnes, při zdokonalené konstrukci a dokonale vyřešeném chlazení, se používají téměř všeobecně. Zejména stroje malých výkonů jsou vždy

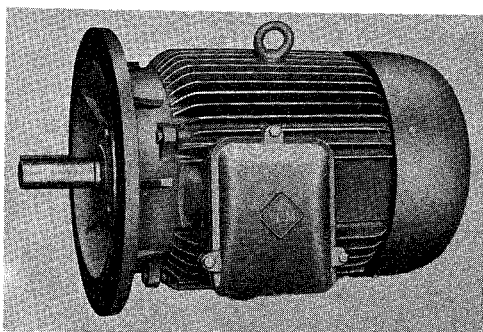
v zavřeném provedení a s povrchovým chlazením (IP 44/g). Jejich větší cena je vyvážena větší bezpečností a delší životností.

Problémem při konstrukci zavřených motorů je

1. chlazení,
2. kondenzování vody, k němuž dochází při odstavení motoru.

Voda se do motoru dostává jednak ze vzduchu a jednak vypařováním z vinutí. K odstranění kondenzátu má každý zavřený motor ve spodní části kostry otvor o průměru asi 10 mm.

Vzhled typického provedení zavřeného motoru s povrchovým chlazením je na obr. 146.



Obr. 146. Typický vzhled zavřeného motoru s povrchovým chlazením IP 44/g, tvar M 301 (WEM Wernigerode, NDR)

3.24.2. Zavřený motor středního výkonu

Na obr. 147 je řez zavřeným motorem s povrchovým chlazením typu F (MEZ Frenštát, n. p.).

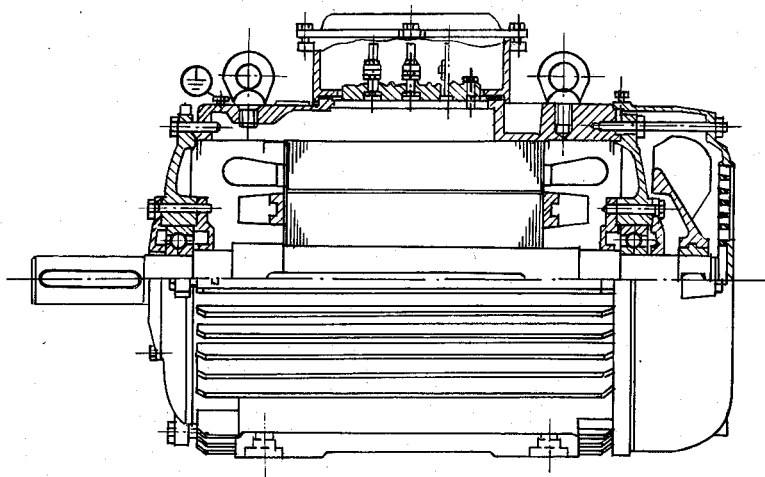
Statorové plechy jsou přímo nalisovány na vnitřní obvod statorové kostry, aby byl dobrý přestup tepla na jeho povrch. Kostra je žebrovaná a je uzavřena dvěma hladkými ložiskovými štíty. U větších výkonů jsou žebrované i ložiskové štíty.

Teplu se z žebrovaného povrchu kostry odvádí proudem vzduchu, který na něj fouká ventilátor, naklínovaný na hřídeli zvenku, těsně u předního ložiskového štítu.

Proudění vzduchu uvnitř stroje obstarávají u strojů menších výkonů jen lopatky hliníkové klece. Větší motory mají zvláštní ventilátor.

Statorové plechy zavřených motorů jsou na vnějším obvodu spojeny

nakrátko tělesem kostry, a proto se z nich musí po prostřížení odstranit velmi pečlivě otřepy, aby se nespojily i na svém vnitřním obvodu. Vznikl by tak závit nakrátko, který by způsobil vypalování plechů vířivými proudy.



Obr. 147. Zavřený motor s povrchovým chlazením IP 44/g, M 101, typ F, 4 až 100 kW (MEZ Frenštát, n. p.)

3.24.3. Nová řada československých zavřených motorů s kotvou nakrátko

Nejnovějším typem zavřených indukčních motorů s kotvou nakrátko, určených pro všeobecné použití, je řada M4A a 3AP. Je výsledkem společného projektu Výzkumného ústavu elektrických strojů v Brně a projekční kanceláře VNIIEM v Moskvě a jsou v ní uloženy zkušenosti výrobních podniků našich i sovětských.

Přiřazení výkonů k montážním rozměrům je řešeno ve dvou alternativách:

typ M4A – podle normalizačního doporučení RVHP

typ 3AP – podle západoevropského doporučení skupiny CENEL.

Jakost projekce nové řady dokumentuje ta skutečnost, že velikost nového motoru je asi polovina velikosti motoru stejného výkonu z let 1945 až 1960.

Motory nové řady jsou s kotvou nakrátko. Klec je vyrobena z hliníku tlakovým litím na poloautomatických stříkacích lisech.

Kostra je hliníková, žebrovaná na čtyřech stranách. Pro návrh žebrování byly využity nejnovější výsledky ventilačních a tepelných výzkumných prací VÚES v Brně.

Svorkovnice je umístěna v horní části kostry a její horní část se dá natáčet o 90°.

Ložiskové štíty jsou odlity ze šedé litiny a tvoří současně vnější ložiskové víčko. Přední štít nese plechový kryt vnějšího ventilátoru. Ventilátor je z plastické hmoty. Kuličková ložiska jsou ve směru dovnitř motoru uzavřena ocelovým těsnicím kroužkem.

Statorového vinutí má izolaci třídy B. Vodiče jsou měděné s emailovou izolací. Vinutí je jednovrstvové a ukládané do statorového svazku na poloautomatickém navíjecím stroji.

Motory typu 3AP jsou ve výrobním programu n. p. MEZ Mohelnice od roku 1974, motory typu M4A budou v programu od r. 1980.

Provozní parametry jednotlivých motorů odpovídají motorům světové úrovně.

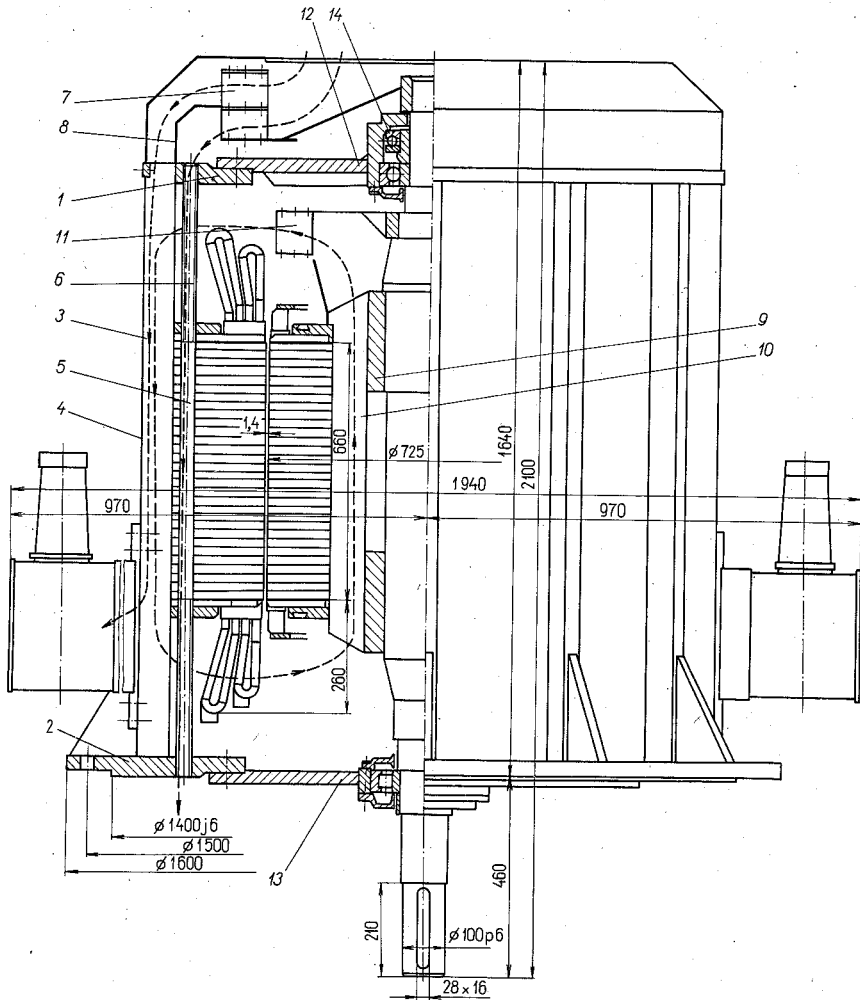
3.24.4. Zavřené motory s trubkovým chlazením

Zavřené motory s povrchovým chlazením můžeme zhotovit s litinovými žebry jen do určitého výkonu. Ztráty totiž rostou asi s třetí mocninou průměru, ale chladicí povrch jen s druhou mocninou. Chlazení větších strojů je třeba potom zabezpečovat protiproudovým vodním chladičem. Ten se však často nedá použít pro nedostatek vhodné vody a pro nedostatek místa, zejména u vertikálních motorů.

Proto v n. p. ČKD už v roce 1950 začali s výrobou zavřených motorů s trubkovým chlazením, které jsou ve srovnání s motory s litými žebry značně lehčí a výhodnější.

Na obr. 148 je sestavení svislého přírubového motoru s vírovou kotvou a s trubkovým chlazením, výkonu 170/50 kW při otáčkách 730/490 min⁻¹.

Statorové plechy mají na vnějším obvodu 54 otvorů průměru 34 mm. Statorový svazek se stahuje tak, že plechy se sevřou mezi dvě postranice a do osmnácti otvorů se vloží ocelové trubky, které se do otvorů v postranicích zavaří.

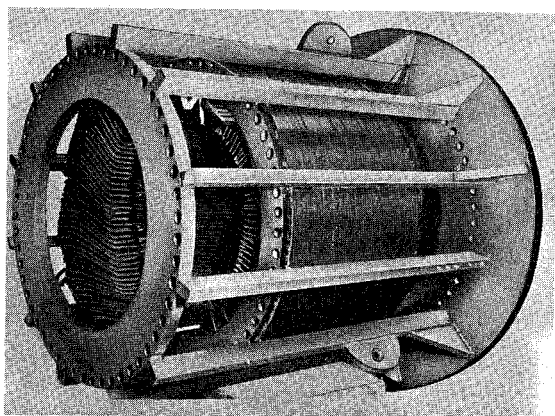


Obr. 148. Zavěný svislý motor s trubkovým chlazením, tvar M 101, 170 kW, 490 min⁻¹, 6000 V (ČKD Praha, o. p.)

- 1 – přední čelo kostry, 2 – zadní příruba kostry, 3 – nosné žebro kostry, 4 – vlnitý plech, 5 – kruhové kanály ve statorovém svazku, 6 – chladičí trubky, 7 – dvojitý vnější ventilátor, 8 – dvojitý kryt, 9 – rotorový nákrůžek, 10 – rotorová žebra, 11 – vnitřní ventilátor, 12 – přední ložiskový štít, 13 – zadní ložiskový štít, 14 – axiální ložisko

Na takto vyrobený svazek se zvenku navaří dvanáct nosných žebér 3 z válcovaného profilového železa. Tato žebra nesou na jedné straně přední čelo kostry 1 a na druhé je k nim přivařena příruba 2, která bude sloužit k upevnění motoru k poháněnému stroji. Prostor mezi čely kostry (1; 2) a žebry je uzavřen vlnitým plechem tloušťky 1 mm.

Kruhové kanály 5 ve statorovém svazku jsou s otvory v čelech kostry spojeny ocelovými trubkami 6. Podrobnosti kostry jsou na obr. 149.



Obr. 149. Kostra trubkového motoru podle obr. 148

Motor je uzavřen plochými ložiskovými štíty 12 a 13. V pouzdru předního ložiskového štítu je kromě vodícího ložiska umístěno i axiální kuličkové ložisko 14, které zachytává celou hmotnost rotoru.

Rotorovou hvězdu tvoří dva nákrůžky 9, na něž jsou navařena plochá žebra 10.

Vnější oběh vzduchu obstarává dvojitý ventilátor 7, který přes dvojitý kryt 8 fouká chladicí vzduch jednak přes trubky do kanálů ve statorovém svazku, jednak kolem krytu motoru z vlnitého plechu.

Tím, že se chladicí vzduch dostává přímo do prostoru statorových plechů, lze zvětšit magnetickou indukci v železe, a tak zlepšit magnetické využití stroje.

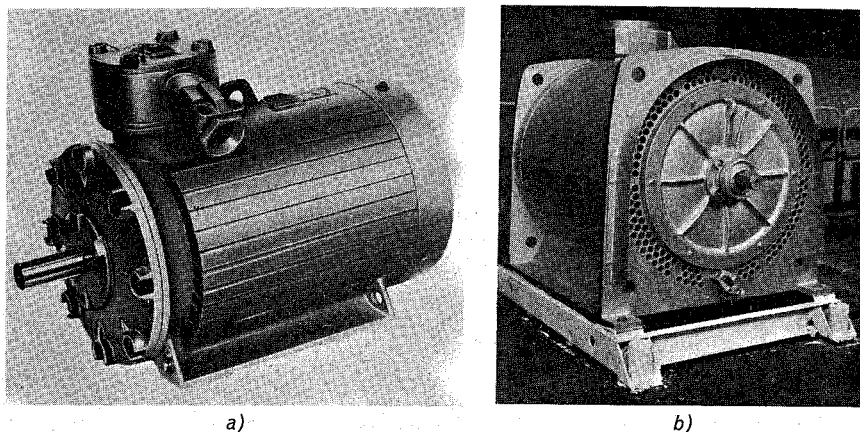
Vnitřní oběh zabezpečuje jednoduchý ventilátor 11, který nasává vzduch z otvorů pod rotorem a protlačuje ho přes zadní čela vinutí kolem chladicích trubek vnitřního prostoru plechových vln, v nichž se účinně ochlazuje. Odtud se přes čela statorového vinutí a rotorové kanály dostává zpět k ventilátoru.

Velkou výhodou motorů s trubkovým chlazením je malá tepelná kapacita kostry, která umožňuje větší využití motoru při přerušovaném zatížení.

3.24.5. Motory nevýbušného provedení

Pro prostory s nebezpečím výbuchu musí být motory jako i ostatní elektrická zařízení uloženy ve vyhovujícím *nevýbušném uzávěru*.

Podrobnosti jsou v ČSN 34 1480 – Předpisy pro nevýbušná elektrická zařízení.



Obr. 150.

- a) Nevýbušný motor nakrátko řady M, provedení Ex3/g – SD (MEZ Frenštát, n. p.),
b) nevýbušný motor nakrátko, provedení Ex3/f – PC, 250 kW, 6000 V, chladič systému vzduch – vzduch (ČKD Praha, o. p.)

Na obr. 150 jsou dva příklady provedení nevýbušných indukčních motorů s pevným uzávěrem.

Charakteristické znaky nevýbušného motoru jsou

1. Zavřené provedení, obvykle s povrchovým chlazením.
2. Robustní a pečlivě vyrobená konstrukce.
3. Vypuklé ložiskové štíty, které zaručují větší mechanickou pevnost.
4. Dosedací plochy pro osazení ložiskových štítů jsou přesně opracované a tolerované, minimální rozměry jsou předepsány pro jednotlivé třídy výbušnosti v ČSN 34 1480.

5. Hřídel motoru je předimenzován a utěsněn dlouhými labyrintovými ucpávkami nebo speciálními těsnicemi kroužky GUFERO.

6. Hlavy a matice šroubů jsou trojhranné, zapuštěné ve vystupujících kruhových komůrkách, takže se dají utahovat jen speciálním nástrčkovým klíčem, který vyloučí sklouznutí a případný vznik jiskry. Šrouby se nesmějí silně dotahovat, aby při výbuchu nepraskly.

7. Prodloužený zvonitý nátrubek na tělese svorkovnice, chránící přívodní kabel před ostrým ohybem a tím před nebezpečím přetržení.

8. Přívodní vodiče mají o stupeň větší průřez.

V prostorách s nebezpečím výbuchu jsou nepřipustné řemenové převody vzhledem k možnému vzniku elektrostatických nábojů.

3.24.6. Jeřábové motory

Jsou to zavřené motory zvláště upravené pro těžký a náročný provoz. Vyznačují se zvláště robustní konstrukcí. Jsou vždy s kroužkovou kotvou, aby byly říditelné tak, jak to provoz jeřábu vyžaduje. Se zřetelem na časté spouštění nemají odklápeč kartáčů. Vzhledem k častým rozběhům je rotor zvláště tepelně namáhán a povrchové chlazení je zesíleno přidavným vnitřním ventilátorem.

Typovým výkonem jeřábového motoru se rozumí výkon při zatěžitelnosti 40 % – S3 (viz III díl). Výrobce musí navíc udat i výkon při zatěžitelnosti 25 a 60 %.

Mechanicky musí být motor dimenzován na dvojnásobné průběžné otáčky, tzn. $2n_n$.

3.25. ZVLÁŠTNÍ KONSTRUKCE INDUKČNÍCH MOTORŮ

3.25.1. Vmontované motory

umožňují dokonalé spojení motoru s poháněným strojem. Nemají samostatnou kostru, jejich stator je zalisován do kostry poháněného stroje a rotor je nasazen přímo na hřídel.

3.25.2. Tandemové motory

slouží k pohonu výtahů. Skládají se ze dvou motorů uložených ve společné kostře s různými otáčkami na jednom hřídeli.

3.25.3. Převodové motory

používají se k pohonu strojů s malými otáčkami místo nákladnějších volnoběžných motorů s horšími provozními vlastnostmi. Důkladně a účelně řešené ozubené převody, někdy kombinované i s klínovým řemenem, jsou umístěny ve společné kostře s motorem.

3.25.4. Bubnové motory

tvorí přímo vodící buben pásového dopravníku. Motor je uložen uvnitř bubnu a točivý moment se na něj přenáší ozubeným převodem, který je přizpůsoben požadované rychlosti dopravníkového pásu.

3.25.5. Brzdové motory

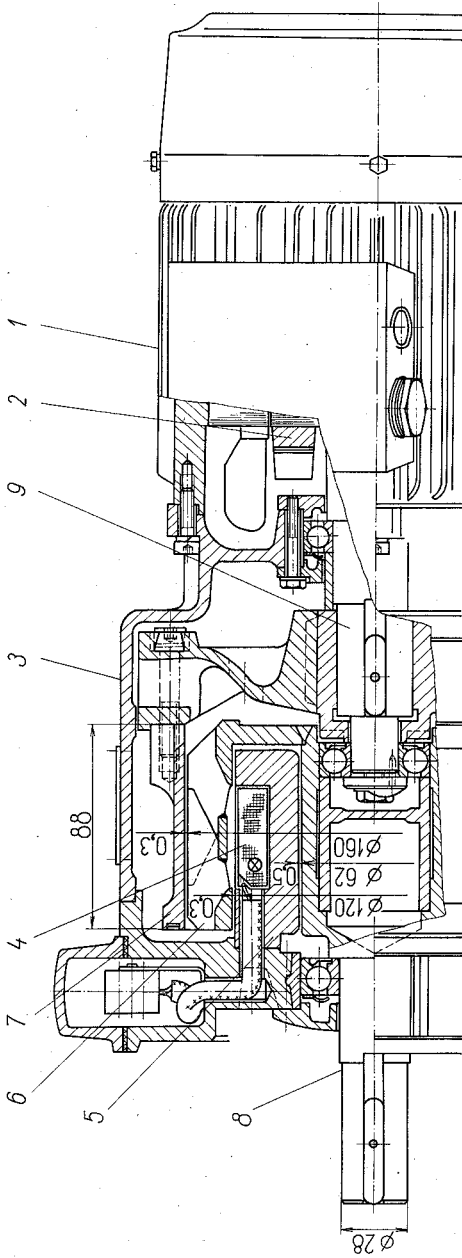
jsou to motory s kotvou nakrátko, vybavené elektromagneticky ovládanou mechanickou třecí brzdou, nasazenou uvnitř motoru přímo na jeho hřídel. Elektromagnet brzdy je paralelně připojen ke statorovému vinutí. Pokud motor stojí, je tlakem pružin brzdy zabrzděn. Po zapnutí elektromagnet motor samočinně odbrzdí. Kromě výkonu motoru se udává i brzdny moment. Podle potřeby může být tento moment dodatečně nastaven až na třetinu momentu jmenovitého.

3.25.6. Stopmotory

představují zvláštní konstrukci brzdových motorů. Jejich vzduchová mezera je kuželovitá, takže po zapnutí je rotor vtahován do dutiny statoru. Vzniklý posuv proti tlaku brzdny pružiny uvolní třecí brzdu.

3.25.7. Indukční spojka (IS)

je nový prvek v oblasti pohonu, vložený mezi hnací motor a pracovní stroj. Odstraňuje proudové i mechanické nárazy, čímž přispívá k prodloužení životnosti pohonu. Slouží k přenosu točivého momentu z hnacího hřídele na hnaný hřídel prostřednictvím elektromagnetického pole, s vyloučením třecího přenosu.



Obr. 151. Řez indukční regulační jednotkou typu S, výkon 0,55 až 30 kW
(MEZ Frenštát, n. p.)

- 1 — pohonný motor s kotvou nakrátko, 2 — rotor pohonného motoru, 3 — těleso indukční spojky,
 4 — budicí cívka, 5 — stojící jádro budicí cívky, 6 — drápkový rotor indukční spojky, — magnetové kolo,
 7 — vírová kotva spojky, 8 — výstupní hřídel, 9 — hřídel pohonného motoru

Hlavní části indukční spojky (obr. 151) jsou: 4 – budicí cívka, uložená v pevném masívním jádře 5, 6 – magnetické kolo spojené s hnacím výstupním hřídelem 8, opatřené na obvodu drápkovým systémem, který vytváří určitý počet pólů střídavě opačné polarity S a J, 7 – kotva spojená s hřídelem poháněcího motoru 9.

Na obr. 151 je tzv. vírová kotva, vytvořená ocelolitinovým válcem. Může se použít i tzv. indukční (asynchronní) kotva, vytvořená z dynamových plechů a na vnitřním obvodu opatřená klecovým vinutím.

Kotva spojená s hřídelem poháněcího motoru se otáčí stálými otáčkami rovnajícími se otáčkám motoru. Vlivem pulsujícího magnetického pole se v jejím tělese indukuje určitý proud, který vybudí své vlastní magnetické pole kotvy.

U indukční kotvy se tento proud indukuje ve vinutí klece.

Vzájemným působením magnetického pole kotvy a pole budicí cívky, které prochází zubovými póly magnetového kola, vzniká točivý moment, jímž je magnetové kolo unášeno. Velikost tohoto momentu závisí na velikosti budicího proudu pevné cívky a na rozdílu otáček kotvy a magnetového kola, tj. na skluzu. Čím je větší, tím je pulsování stojícího pole vlivem zubových pólů magnetového kola intenzivnější a tím větší proud se v kotvě indukuje. Spojka se tedy chová v principu jako indukční motor. Její momentová charakteristika je podobná charakteristice indukčního motoru, zejména u indukční kotvy. Pro vírovou kotvu je téměř přímková, což je právě její velká přednost (je bez bodu zvratu).

Velikost přenášeného momentu lze jednoduše řídit od nuly až po maximum změnou budicího proudu pevné cívky.

Indukční spojku lze tedy použít k plynulému řízení otáček (při stálém momentu) nebo k plynulému řízení přenášeného momentu. Řízení budicího proudu obstarává vhodně upravený tyristorový usměrňovač.

Pro snímání otáček může být na výstupním hnacím hřídeli 8 umístěn jednoduchý střídavý tachoalternátor, který svým proměnným napětím řídí budicí usměrňovač. Indukční spojka se může dodávat samostatně (se dvěma hřídeli) nebo (obvykle s kotvou nakrátko) se spojuje v jeden konstrukční celek s pohonným motorem, jak je to vyznačeno na obr. 151. Vznikne tak indukční regulační jednotka (IRJ), která se hodí pro pohon navijecích strojů, strojů pro barevný tisk, spřádacích strojů, dopravníků, kalandrů, lisů, výtahů, jeřábů apod.

3.25.8. Lineární motor

je indukční motor s trojfázovým vinutím rozloženým do roviny a uloženým v drážkovaném listěném „statorovém“ železe, takže místo točivého magnetického pole vzniká tzv. pole postupné, které svým silovým působením na vhodně upravený a také do roviny rozvinutý rotor (indukt z plného vodivého materiálu) vyvolává posuvný pohyb.

Podle způsobu použití může primární budicí vinutí se svým magnetickým jhem stát, potom je pohyblivý indukt (sekundární část) nebo naopak.

Výhody lineárního motoru jsou

- a) odstranění otáčejících se částí,
- b) zjednodušení konstrukce,
- c) menší hmotnost,
- d) lepší tepelné poměry,
- e) rychlost neomezená obvodovou rychlostí.

Nevýhodou je především menší účinnost, větší magnetizační proud a při některých úpravách stejnosměrný magnetický tah.

4. SYNCHRONNÍ STROJE

4.1. ZÁKLADNÍ POJMY

4.1.1. Rozdělení a uspořádání synchronních strojů

Podle ČSN 35 0200 je synchronní stroj takový elektrický točivý stroj, jehož kmitočet svorkového napětí je přímo úměrný otáčkám. Rotor synchronního stroje se tedy otáčí současně s točivým magnetickým polem statoru.

Podle účelu se synchronní stroje dělí na

1. Alternátory – synchronní generátory na výrobu střídavého proudu. Speciální typy jsou

- a) turboalternátory – poháněné parní nebo plynovou turbínou,
- b) hydroalternátory – poháněné vodní turbínou.

2. Synchronní motory – stroje na přeměnu elektrické energie na mechanickou energii při stálých synchronních otáčkách, které jsou dány kmitočtem sítě.

Speciálním typem je:

Synchronovaný indukční motor, který se rozbíhá jako kroužkový motor a po rozběhu se budí stejnosměrným proudem, takže pracuje jako synchronní motor.

3. Synchronní kompenzátory – pracují jako motory naprázdno a podle nastaveného buzení dodávají do sítě jen jalový výkon. Slouží k řízení napětí a účinniku sítě.

4. Synchronní konvertory – se používají k přímé přeměně střídavého proudu na proud stejnosměrný nebo naopak (jednokotvový měnič).

5. Středofrekvenční alternátory – slouží k výrobě středofrekvenčního proudu (od 2000 do 10 000 Hz) zejména pro potřebu metalurgie (indukční tavicí pece).

Synchronní stroj se skládá ze statoru tvořícího mezikruhový svazek složený z dynamových plechů a opatřený střídavým, obvykle troj-

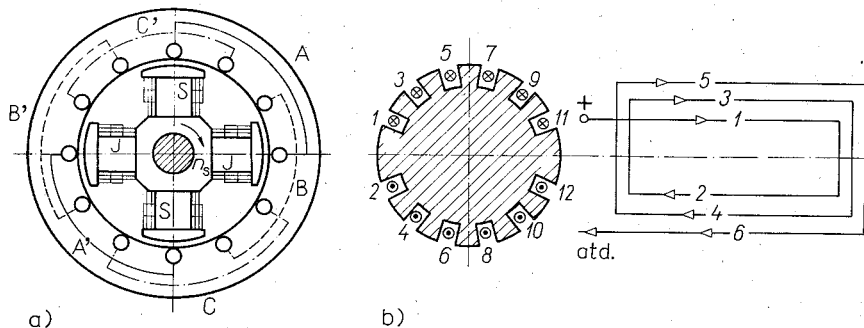
fázovým vinutím a z rotoru, který je tvořen soustavou pólů, buzených stejnosměrným proudem. Otáčejícím se magnetickým polem rotoru se ve stojícím statorovém vinutí indukuje napětí, takže stator synchronního stroje představuje jeho kotvu (indukt).

Podle uspořádání rotoru jsou synchronní stroje

1. S vyjádřenými póly – rotor je složen z rotorového kola, na němž je upevněn určitý počet pólů (čtyři a více) a každý pól má svou budící cívku.

2. S hladkým rotorem – rotor tvoří pevný válec, který má na povrchu podélné drážky a v nich je uloženo soustředné budící vinutí napájené stejnosměrným proudem tak, že rotor se magnetuje (obvykle dvoupólově).

Alternátory i synchronní motory jsou zpravidla trojfázové, neboť vzhledem k jednofázovým mají mnohé přednosti. Jednofázové generátory se používají jen ojediněle, v některých speciálních případech.



Obr. 152. Uspořádání synchronního stroje
a) stroj s vyjádřenými póly, b) buzení stroje s hladkým rotorem

Trojfázový alternátor představuje dnes téměř výhradní zdroj elektrické energie. Výhodný je zejména proto, že jej lze hospodárně vyrobit právě pro velké výkony. Ve spojení s transformátorem umožňuje hospodárný přenos obrovských výkonů na velké vzdálenosti. Jím napájená trojfázová síť dává k dispozici dvojnásobné napětí a mohou se k ní připojovat nejjednodušší indukční motory.

Uspořádání čtyřpólového synchronního stroje s vyjádřenými póly je na obr. 152a.

Na magnetovém kole jsou čtyři póly, jejichž budicí vinutí je napájeno stejnosměrným proudem ze zvláštního zdroje, obvykle samostatného derivačního dynama – *budiče*, a budí střídavě severní a jižní pól. Ve statorových drážkách je podobně jako u indukčních strojů uloženo trojfázové vinutí. U čtyřpólového stroje ho tvoří tři dvojice cívek (A – A', B – B', C – C') navzájem posunuté o 120° el. Budič bývá obvykle umístěn na společném hřídeli s rotorem a budicí proud se k budicím cívkám přivádí prostřednictvím dvou kroužků a kartáčů, které na ně dosedají.

Jde-li o *generátor*, otáčí se magnetové oko působením vnějšího momentu (spalovací motor, vodní turbína apod.) a jeho otáčející se magnetické pole indukuje ve statorovém vinutí trojfázový proud, který odebíráme ze tří pevných svorek. Aby indukovaný proud měl sinusový průběh, jsou na pólech nástavce, které zabezpečují sinusové rozložení magnetického toku po obvodu vzduchové mezery.

Opačná úprava synchronního stroje s magnety na statoru a s kotvou na rotoru není vhodná, neboť odběr proudu z otáčejícího se vinutí prostřednictvím tří kroužků by zejména při vyšších napětích způsoboval velké těžkosti. Používal se jen v ojedinělých případech, při malých výkonech a nízkých napětích.

Za každou otáčku vykoná indukované napětí p kmitů, takže při synchronních otáčkách n_s je kmitočet

$$f = \frac{pn_s}{60} \quad [\text{Hz}; \text{min}^{-1}] \quad (296)$$

Požadujeme-li v síti kmitočet f , musí mít rotor otáčky

$$n_s = \frac{60f}{p} \quad [\text{min}^{-1}; \text{Hz}] \quad (297)$$

Právě pro tuto přímou závislost kmitočtu a otáček se používá název *synchronní stroj*.

Z rovnice (297) je vidět, že při malých otáčkách, jaké jsou obvyklé u vodních turbín na malé spády a velká množství vody, musí mít stroj velký počet pólů. Například pro nejmenší normalizované otáčky hydroalternátorů $n_s = 75 \text{ min}^{-1}$ vychází počet pólových dvojic

$$p = \frac{60f}{n_s} = \frac{60 \cdot 50}{75} = 40$$

tedy 80 pólů.

Charakteristickým znakem hydroalternátorů je větší průměr, úměrný většímu počtu pólů (bývá i několik metrů). Tomu odpovídá i menší osová délka.

Privádí-li se do statorového vinutí trojfázový proud, vzniká točivé magnetické pole, které je schopno s sebou unášet magnetové kolo buzeného rotoru. Tak vznikne *synchronní motor*, který se po roztočení otáčí současně s točivým magnetickým polem přesně synchronními otáčkami. Ty se nemění ani při zatížení.

Velmi výhodné je přímé spojení alternátoru s rychloběžnými parními nebo plynovými turbínami. Ty pracují hospodárně právě při otáčkách 3000 min^{-1} , takže při normálním kmitočtu 50 Hz musí být rotor dvoupólový. Takový stroj však není možné vzhledem k mechanickému namáhání odstředivými silami a vzhledem k využití prostoru při větších výkonech zhotovit s vyjádřenými póly. Proto tzv. *turboalternátory* mají rotorové budící vinutí uloženo v drážkách na povrchu masivního kovaného ocelového válce (obr. 152b). Vinutí je tvořeno soustřednými cívkami upravenými a zapojenými tak, že vybudí dvoupólové magnetické pole. Aktivní drážky vyplňují jen 2/3 obvodu. Prostor v ose pólů je bez vinutí; bývají v něm jen ventilační drážky nebo zářezy, jimiž se vyrovná rozdíl v momentech setrvačnosti k jednotlivým osám a tím i rozdílnost v kritických otáčkách.

Drážky jsou uzavřeny přesně lícovanými kovovými nemagnetickými klíny a přes čela budícího vinutí jsou nataženy bandážovací kruhy z nemagnetické oceli, takže rotor má tvar hladkého válce.

Abychom nepřekročili dovolené namáhání rotoru, musí být jeho průměr poměrně malý (nejvýše 1270 mm, výjimečně až 1333 mm při 3000 min^{-1}), takže pro určitý výkon musí mít stroj velkou osovou délku. Délka celého rotoru bývá i více než 10 m.

Turboalternátory představují po konstrukční a technologické stránce nejtěžší problémem téměř celého strojírenského průmyslu, neboť kromě nevýhodného poměru rozměrů (malý průměr, velká délka) se vyznačují tím, že pracují na mezi mechanického i elektrického namáhání.

Synchronní motory s otáčkami 3000 min^{-1} jsou konstrukčně stejně zhotoveny jako turboalternátory a nazývají se *turbomotory*.

4.2. NAPĚTÍ INDUKOVANÉ VE VINUTÍ

4.2.1. Magnetické pole

Aby se ve vinutí stroje indukovalo harmonické střídavé napětí, má mít magnetická indukce ve vzduchové mezeře sinusový průběh. Toho se dosáhne vhodným tvarováním pólového nástavce. Přesně sinusového průběhu by bylo možné dosáhnout jen velmi obtížně výrobitelným nástavcem. Ve skutečnosti má tvar podle obr. 153.

Magnetickou indukci o amplitudě B_{\max} nahrazujeme první harmonickou o amplitudě B_{δ} , takže magnetický tok jednoho pólu je

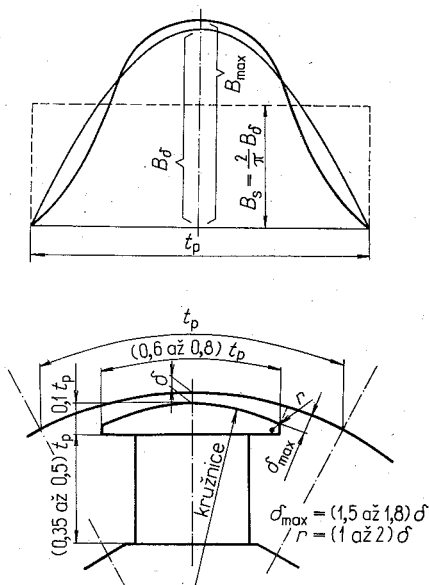
$$\Phi = \frac{2}{\pi} B_{\delta} l_e t_p \quad (298)$$

Magnetický tok jdoucí jhem pólu je větší o rozptylový tok

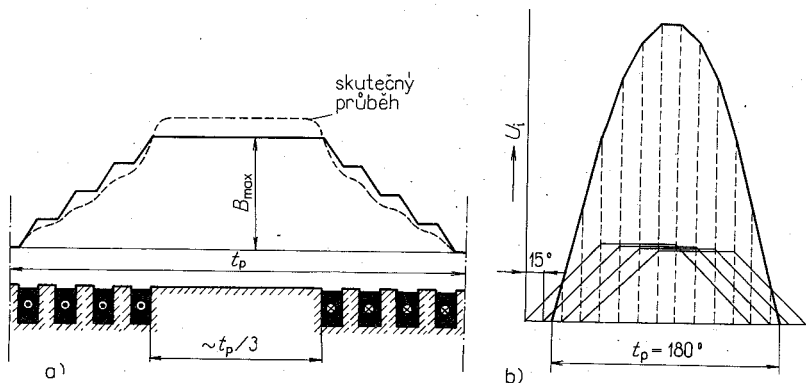
$$\Phi_m = (1 + \tau) \Phi \quad (299)$$

příčemž činitel rozptylu mezi póly je

$$\tau = 0,1 \text{ až } 0,35$$



Obr. 153. Tvar pólového nástavce pro sinusový průběh magnetické indukce



Obr. 154. Magnetické pole hladkého rotoru

a) lichoběžníkový průběh magnetické indukce, b) výsledné napětí indukované lichoběžníkovým průběhem magnetické indukce

Údaj 0,1 platí pro stroje čtyřpólové až šestipólové a pro stroje s nízkými póly, údaj 0,35 pro volnoběžné stroje a stroje s větším počtem pólů.

Průběh magnetické indukce hladkého rotoru je lichoběžníkový podle obr. 154a. Vlivem přesycených zubů mezi drážkami a málo syceného širokého zubu v ose pólu je skutečný průběh indukce nakreslen přerušovanou čarou.

Napětí indukovaná tímto polem v jednotlivých cívkách jsou také lichoběžníková, ale jejich součet (zejména při velkém počtu drážek na pól a fázi) je blízký sinusovému průběhu. Na obr. 154b je průběh výsledného napětí pro $q = 4$ ($\alpha = 15^\circ$).

4.2.2. Velikost indukovaného napětí

Uvažujeme-li sinusový průběh první harmonické magnetického toku, je efektivní hodnota napětí indukovaného v jedné fázi trojfázového statorového vinutí stejná jako u indukčních strojů (166)

$$U_i = \pi \sqrt{2} \Phi f N_s k_v \quad (300)$$

Kmitočet f závisí na počtu pólů a na otáčkách.

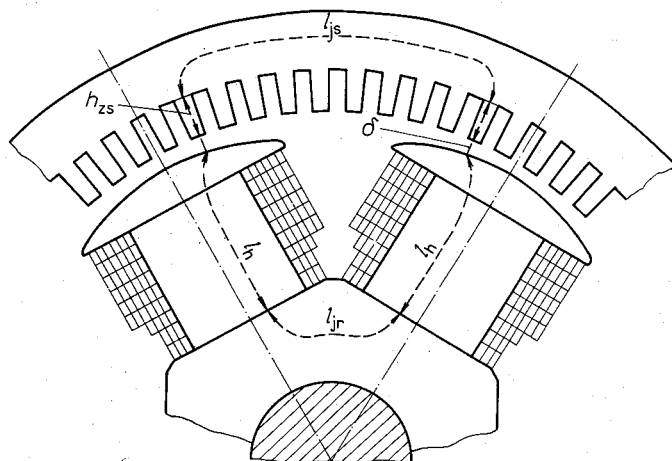
Kromě vhodného tvarování pólových nástavců přispívá k sinusovému průběhu napětí i vhodná úprava vinutí, kterou můžeme potlačit tzv. vyšší harmonické. Podrobnosti jsou ve III. díle.

4.2.3. Magnetický obvod

Magnetický obvod synchronního stroje s vyjádřenými póly je vyznačen na obr. 155.

Celkové magnetomotorické napětí potřebné k protlačení magnetického toku obvodem jedné pólové dvojice je dáno součtem magnetických napětí pro jednotlivé úseky obvodu.

Výpočet magnetických napětí (podobný výpočtu pro indukční stroj) je uveden ve III. díle.



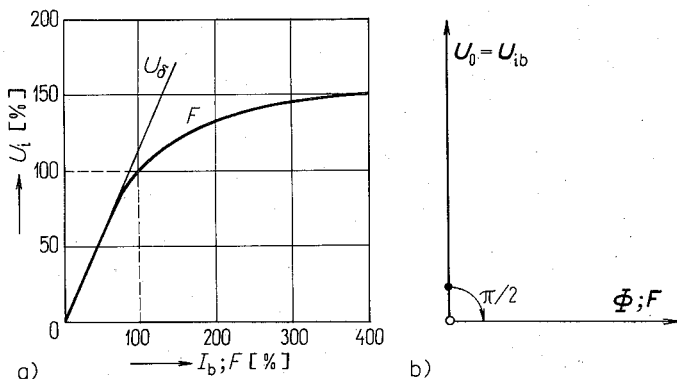
Obr. 155. Magnetický obvod stroje s vyjádřenými póly

Potřebný budicí proud pro N_h závitů na jednom pólu je

$$I_b = \frac{F}{2N_h} \quad (301)$$

Každé další velikosti budicího proudu odpovídá jiný magnetický tok, a tedy i jiné napětí. Závislost magnetického toku nebo napětí naprázdno na buzení udává *charakteristika naprázdno*, jejíž normální průběh je vyznačen na obr. 156a.

V oblasti malých indukcí (tzn., že napětí je asi 40 až 60 % jmenovitého napětí) probíhá charakteristika podle přímky U_s , která představuje charakteristiku vzduchové mezery. Pro vyšší napětí se od této přímky vlivem nasycení železa (zejména zubů) značně odklání.



Obr. 156. Synchronní stroj naprázdno
 a) normální tvar charakteristiky naprázdno, b) fázorový diagram
 pro chod naprázdno

4.3. PROVOZNÍ STAVY

4.3.1. Chod naprázdno

Poměry při chodu naprázdno vystihuje fázorový diagram na obr. 156b. Indukované napětí předbíhá magnetický tok, a tedy i příslušné magneto-motorické napětí o čtvrtinu kmitu.

Při chodu naprázdno se svorkové napětí U_0 rovná indukovanému napětí U_{ib} , které je úměrné budicímu magnetomotorickému napětí F_b

$$U_0 = U_{ib} \quad (302)$$

Indexem b budeme označovat veličiny závislé na budicím proudu I_b .

4.3.2. Reakce kotvy

Zatížíme-li stroj, začne jeho statorovým vinutím procházet proud I a ve statoru vznikne reakční magnetický tok Φ_a . Protože jde o trojfázové vinutí, napájené trojfázově, je toto reakční magnetické pole (stejně jako u indukčních strojů) točivým magnetickým polem a otáčí se synchronními otáčkami shodnými s otáčkami rotoru.

Podle vztahu (173) je reakční magnetomotorické napětí zatěžovacího proudu pro $m = 3$ dáno výrazem

$$F_a = 0,9mI \frac{N_s}{p} k_v = 2,7I \frac{N_s}{p} k_v \quad (303)$$

Magnetický tok způsobený tímto magnetomotorickým napětím závisí na odporu magnetického obvodu, tedy především na velikosti vzduchové mezery.

U stroje s *hladkým rotorem* je vzduchová mezera po celém obvodu stálá, takže reakční magnetický tok je všude přímo úměrný magnetomotorickému napětí F_a , přesně sleduje jeho průběh $\Phi_a \sim F_a$, a je tedy sinusový. Sčítá se s magnetickým tokem magnetů Φ_b na sinusový točivý výsledný magnetický tok Φ .

Velikost statorového toku závisí na velikosti zatěžovacího proudu a jeho poloha vzhledem k magnetickému toku magnetů závisí na jeho fázovém posunu.

4.3.3. Fázorový diagram zatíženého stroje

Fázorový diagram indukčně zatíženého alternátoru (zatěžovací proud ve III. kvadrantu) na obr. 157a vychází z magnetomotorického napětí magnetů F_b , před nímž o úhel $\pi/2$ předbíhá indukované napětí U_{ib} . Reakční magnetomotorické napětí F_a je ve fázi s proudem a sčítá se fázorově s magnetomotorickým napětím magnetů ve výsledné magnetomotorické napětí

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_b + \mathbf{F}_a \quad (304)$$

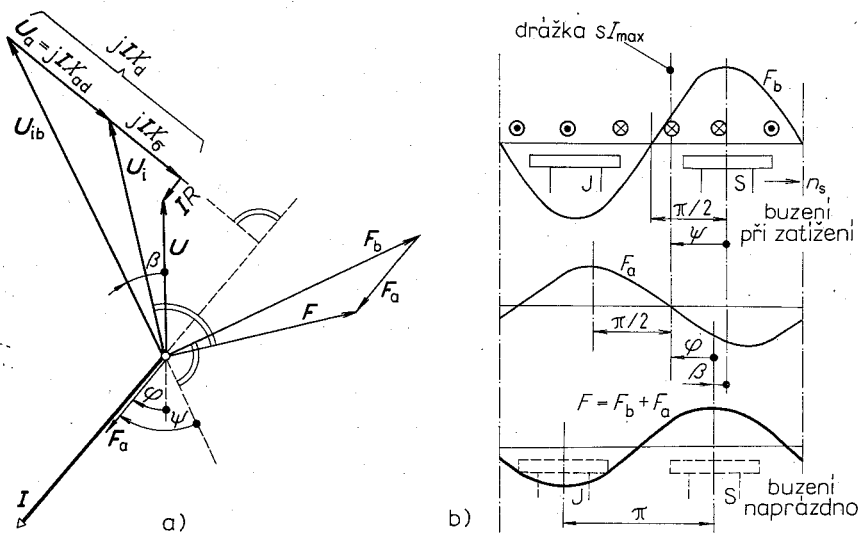
Toto magnetomotorické napětí indukuje ve statoru výsledné napětí U_i , které před ním také předbíhá o $\pi/2$. Reakčnímu magnetomotorickému napětí F_a odpovídá fiktivní napětí U_a , pro které platí

$$\mathbf{U}_{ib} + \mathbf{U}_a = \mathbf{U}_i \quad (305)$$

a které předbíhá proud (a tedy i F_a) o úhel $\pi/2$.

Svorkové napětí U je stejně jako u transformátoru zmenšené vzhledem k napětí U_i o činný úbytek napětí RI a rozptylový reaktanční úbytek napětí $X_c I$.

Poznámka. V diagramu je trojúhelník magnetomotorických napětí podobný trojúhelníku indukovaných napětí. Kreslí se tedy za předpokladu přímkové charakteristiky (stroj s malou indukci), kdy magnetické toky a tím i indukované napětí jsou přímo úměrné magnetomotorickým napětím.

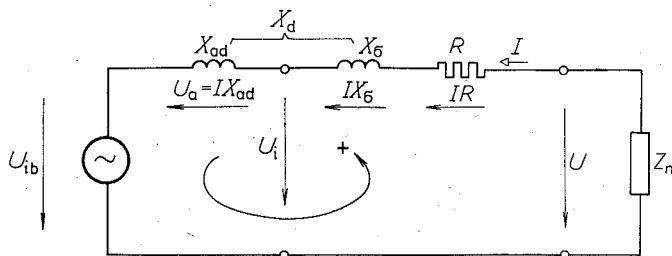


Obr. 157. Synchronní stroj při zatížení
a) fázorový diagram. b) význam úhlů ψ a β

Z fázorového diagramu je vidět, že při obvyklém indukčním zatížení alternátoru působí pole kotvy skutečně reakčně, neboť magnetomotorické napětí F je vlivem reakce kotvy menší než magnetomotorické napětí magnetů F_b , a tedy i výsledný tok indukující výsledné napětí je menší než tok magnetů Φ_b .

Nakreslenému diagramu odpovídá náhradní schéma podle obr. 158.

Skutečný alternátor je v tomto diagramu nahrazen ideálním generátorem bez reakce, bez odporu a bez rozptylu, v němž se indukuje napětí U_{ib} . Tento generátor napájí vnější obvod (zátěž s impedancí Z_n) přes odpor statorového vinutí R , přes rozptylovou reaktanci X_e .



Obr. 158. Náhradní schéma synchronního stroje

a přes tzv. podélnou reaktanci reakce X_{ad} , kterou se nahrazuje vliv reakce kotvy stejně, jako se reaktanci X_{σ} nahrazuje vliv rozptylu kolem statorového vinutí na velikost výsledného napětí skutečně indukovaného ve stroji.

Kladný směr napětí a proudu je přitom zvolen stejně jako v náhradním schématu výstupního vinutí transformátoru, tzn. spotřebitelský systém.

Z náhradního schématu souhlasně s nakresleným fázorovým diagramem podle II. Kirchhoffova zákona dostaneme

$$U_{ib} - U + RI + jX_{\sigma}I + jX_{ad}I = 0$$

z toho

$$U = U_{ib} + RI + j(X_{\sigma} + X_{ad})I \quad (306)$$

Přitom současně platí

$$U_{ib} - U_i + U_a = 0$$

a z toho vychází

$$U_i = U_{ib} + U_a \quad (307)$$

Součet reaktancí

$$X_d = X_{\sigma} + X_{ad} \quad (308)$$

představuje tzv. *synchronní reaktanci*, kterou můžeme vyjádřit v procentech vztahem

$$x_d = \frac{X_d}{Z_n} 100 \quad [%; \Omega] \quad (309)$$

kde Z_n je jmenovitá zatěžovací impedance, odpovídající jmenovitému proudu

$$Z_n = \frac{U}{I_n} \quad [\Omega; V, A] \quad (310)$$

Stejně se v procentech mohou vyjadřovat všechny reaktance a odpory, např.

$$x_{\sigma} = \frac{X_{\sigma}I_n}{U} 100 \quad (311)$$

$$x_{ad} = \frac{X_{ad}I_n}{U} 100 \quad (312)$$

$$r = \frac{RI_n}{U} 100 \quad (313)$$

U velkých synchronních strojů je např.

$$r = 1 \% \quad x_\sigma = 10 \% \quad x_{ad} = 170 \%$$

Ve fázorovém diagramu (obr. 157a) je vyznačen úhel ψ mezi fázory I a U_{ib} . Je to tzv. *vnitřní fázový posun*, který na stroji odpovídá skutečnému prostorovému posunu mezi osou magnetického pólu rotoru a statorovou drážkou s maximálním proudem, takže prostorový posun mezi osami obou polí (F_b , F_a) je $(\pi/2 + \psi)$.

Z diagramu je vidět, že úhel ψ závisí na buzení a na zatížení. Při každé změně zatížení se samočinně přestaví.

Úhel β mezi fázory napětí U a U_{ib} je tzv. *zátěžný úhel*. Je to skutečný úhel (v elektrických stupních), o který je při určitém zatížení a buzení rotorové kolo natočeno z polohy, která by mu příslušela při chodu naprázdno. Je to současně posun osy magnetů za osou výsledného pole ve vzduchové mezeře.

Význam úhlů ψ a β je objasněn na obr. 157b.

Při indukčním zatížení dvoupólového generátoru předbíhá magnetové kolo svou základní polohou o úhel β , u motoru se za touto polohou o stejný úhel zpožďuje. Úhly ψ a β můžeme přímo na stroji vysledovat a změřit. Skutečné posuny jsou u mnohópólového stroje p -krát menší než úhly vycházející z fázorového diagramu.

Na obr. 157b je vyznačeno nejjednodušší trojfázové vinutí, jehož $q = 1$. Osa reakčního magnetického toku odpovídá rozložení statorových proudů. Pro lepší názornost jsou póly hladkého rotoru zobrazeny skutečnými vyjádřenými póly. Proto jsou místo magnetických toků nakresleny jen průběhy magnetomotorických napětí.

Synchronní stroj se chová tak, jako by mezi rotorem a statorovým točivým polem existovalo pružné mechanické spojení.

Při náhlé změně zatížení proběhne rotor vlivem setrvačnosti novou rovnovážnou polohou a když se vrací zpět, může se nebezpečně rozkývat. Toto *kývání synchronního stroje* můžeme tlumit zvláštním tlumičem (amortizérem).

U strojů s vyjádřenými póly tvoří tlumič vodivé tyče v pólových nástavcích spojené po obou stranách silnými spojovacími kruhy, s nimiž vytvářejí neúplnou klec. Při kývání se indukují v tyčích velké proudy, mechanická energie kývání se v nich mění na teplo a tím je rotor tlumen.

Postup kreslení je vyznačen pořadovými čísly v závorkách.

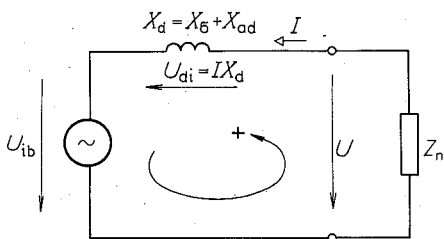
Vycházíme z napětí U_a a z proudu. Podle příslušných úbytků napětí RI a $X_\sigma I$ sestrojíme fázor U_i , jemuž z charakteristiky naprázdno odpovídá magnetomotorické napětí F , přičtené na ose magnetomotorických napětí. Příslušný fázor F zakreslíme kolmo k napětí U_i a k němu přikreslíme fázor reakčního magnetomotorického napětí F_a , jehož velikost určíme z rovnice (303). Magnetomotorické napětí, které musí stroj mít, je potom dáno fázorem F_b , pro nějž platí

$$F_b + F_a = F$$

Příslušné indukované napětí U_{ib} odpovídající přímkové charakteristice U'_δ je kolmé k magnetomotorickému napětí F a jeho velikost udává bod 11.

Trojúhelník U_{ib} , U_{ia} , U_i je tak opět podobný trojúhelníku magnetomotorických napětí F_b , F_a , F .

Po odlehčení stroje se při nezměněném buzení zvětší svorkové napětí na $U_{ib,skut}$, které čteme na skutečné charakteristice naprázdno (bod 14) pro nastavené magnetomotorické napětí F_b .



Obr. 160. Zjednodušené náhradní schéma synchronního stroje

4.3.5. Zjednodušené náhradní schéma a fázorový diagram

Protože činný odpor statorového vinutí je velmi malý, můžeme ho zanedbat a náhradní schéma zjednodušit zavedením jedinné *synchronní reaktance* (obr. 160)

$$X_d = X_\sigma + X_{ad}$$

Nahradí-li se úbytek napětí na této reaktanci fiktivní hodnotou

$$U_{di} = jIX_d = jX_{ad}I + jX_\sigma I = U_a + jX_\sigma I \quad (315)$$

platí podle II. Kirchhoffova zákona

$$U_{ib} - U + U_{di} = 0$$

nebo

$$U = U_{ib} + U_{di} \quad (316)$$

Tomu odpovídá zjednodušený fázorový diagram podle obr. 161a, kde U je svorkové napětí generátoru nebo napětí sítě, na níž je synchronní stroj připojen,

U_{ib} napětí, které je přímo úměrné budicímu magnetomotorickému napětí, resp. budicímu proudu, takže ho i v určitém měřítku vyjadřuje,

U_{di} napětí přímo úměrné zatěžovacímu proudu, které současně udává i jeho fázový posun, neboť se za ním zpožďuje vždy o $\pi/2$.

Činný výkon generátoru je

$$P_G = 3UI_G \cos \varphi$$

takže při stálém napětí je úměrný součinu

$$I_G \cos \varphi \sim P_G$$

a tedy i průmětu

$$U_{di} \cos \varphi \sim P_G$$

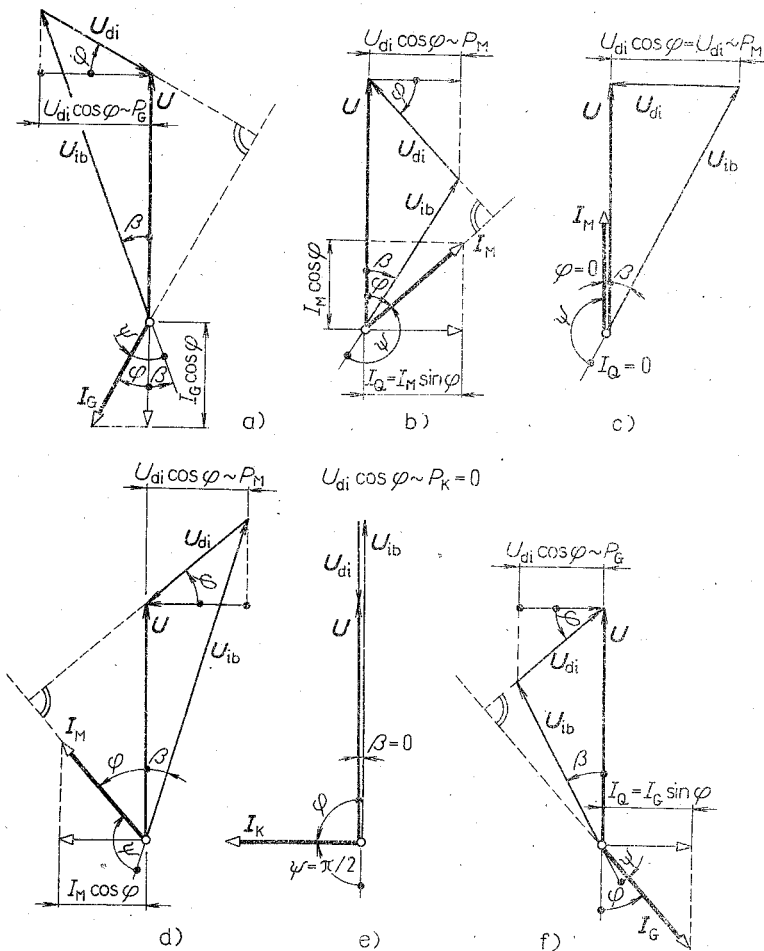
kteřý je v diagramu kolmý k fázoru napětí U .

V souladu s dohodnutým spotřebitelským systémem je průmět proudu $I_G \cos \varphi$ u generátoru orientován proti napětí, takže činný výkon generátoru je záporný.

Na obr. 161b je *diagram synchronního motoru*, který odebírá ze sítě činný i jalový proud (fázor proudu je v prvním kvadrantu). Jde tedy o podbuzený motor, který pro síť představuje indukční zatížení stejně jako indukční motor.

Z orientace úhlu β je vidět, že se magnetové kolo zpožďuje za svou polohou při chodu naprázdno. Zpoždění je tím větší, čím větším výkonem je motor zatížen. Drážka s maximálním proudem nyní předbíhá osu severního pólu o úhel ψ a táhne ho za sebou.

Zvětšením budicího proudu (tedy zvětšením napětí U_{ib}) se fázový posun φ zmenšuje. Vhodným budicím proudem můžeme motor vybudit na $\cos \varphi = 1$, takže neodebírá ze sítě žádný jalový proud a představuje pro ni jen činné zatížení (obr. 161c).



Obr. 161. Fázorový diagram synchronního stroje
 a) generátor při indukčním zatížení, b) podbuzený motor, c) motor vybuzený na $\cos \varphi = 1$, d) přebuzený motor, e) synchronní kompenzátor, f) generátor při kapacitním zatížení

Dalším zvětšením budicího proudu přejde fázor proudu do čtvrtého kvadrantu a motor dodává do sítě jalový proud $I \sin \varphi$. Takto „přebuzený“ motor (obr. 161d) zlepšuje účinnost sítě, zejména jde-li o stroj většího výkonu. Pro síť představuje kapacitní zatížení.

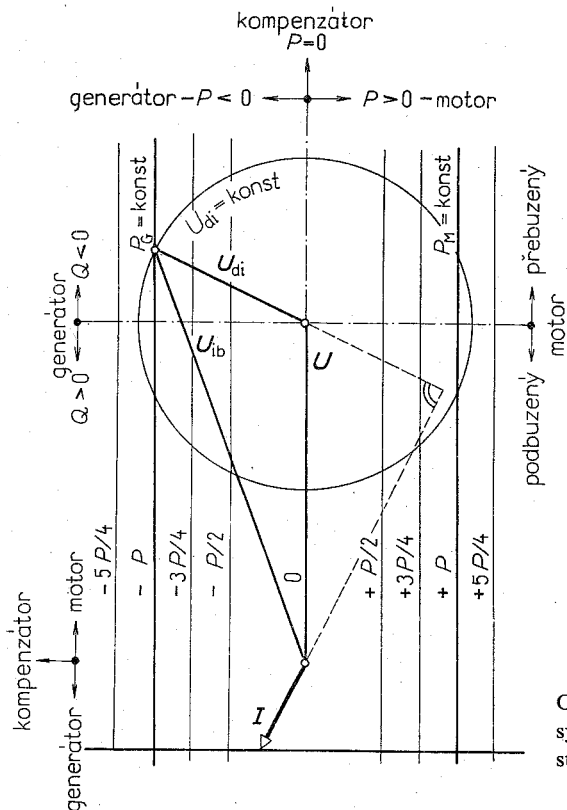
Zvláštním případem je *synchronní kompenzátor* (obr. 161e), jehož činný výkon je nulový. Pracuje jako motor naprázdno ($U_{di} \cos \varphi = 0$), takže $\varphi = \pi/2$, stroj dodává celý jalový proud I_K do sítě a zlepšuje její účinnost. Zátěžný úhel $\beta = 0$; stroj nepřenáší žádný činný výkon.

Na obr. 161f je diagram kapacitně zatíženého generátoru. Stroj odebírá ze sítě jalový proud $I_Q = I_G \sin \varphi$, který je pro něj budícím proudem. Pro plné napětí generátoru postačuje tedy menší buzení než při indukčním zatížení.

4.3.6. Synchronní stroj při stálém výkonu

Z fázorových diagramů na obr. 161 můžeme odvodit diagramy synchronního stroje při stálém výkonu.

Činný výkon generátoru i motoru je podle předcházejícího výkladu úměrný průmětu $U_{di} \cos \varphi$. Vrchol trojúhelníka U , U_{di} , U_{ib} se bude při

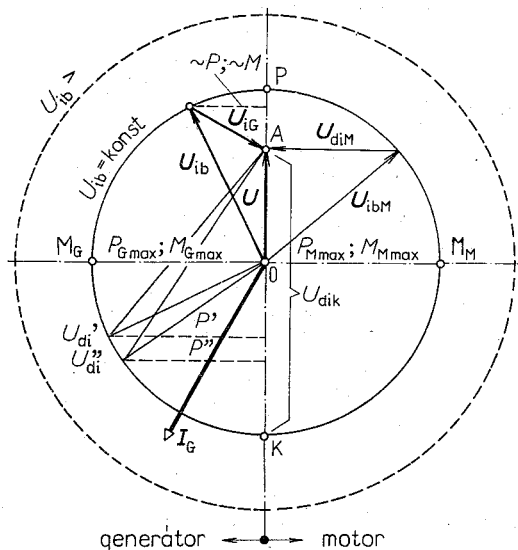


Obr. 162. Diagram synchronního stroje při stálém výkonu

stálém výkonu posouvat po přímce rovnoběžné s fázorem napětí, pro kterou je součin $U_{di} \cos \varphi$ stálý.

Koncový bod fázoru proudu se bude současně posouvat po přímce, pro kterou je součin $I \cos \varphi$ konstantní.

Z takto upraveného diagramu (obr. 162) lze zjistit poměry za různých provozních stavů. Stálému proudu v kotvě odpovídá kružnice o poloměru U_{di} . Diagram je doplněn výkonovými přímkami pro $P/2$, $3P/4$, P a $5P/4$.



Obr. 163. Diagram synchronního stroje při stálém magnetomotorickém napětí (buzení)

4.3.7. Synchronní stroj při stálém budičím proudu

Při stálém budičím proudu se vrchol trojúhelníka U , U_{di} , U_{ib} pohybuje po kružnici se středem v bodu 0 s poloměrem U_{ib} (obr. 163). Každému jinému buzení odpovídá jiná kružnice.

Základní stavy jsou:

a) Bod P odpovídá chodu naprázdno, $P = 0$.

Platí-li

$$U_{ib} > U$$

jde o kompenzátor.

Platí-li

$$U_{ib} < U$$

odebírá stroj ze sítě jalový proud a představuje pro ni indukční zátěž.

b) Bod K odpovídá chodu nakrátko, kdy je také $P = 0$.

Motor za chodu nakrátko stojí a bere ze sítě jalový proud nakrátko, který je úměrný napětí U_{dik} .

Generátor se při zkratu působením ochran odpojí od sítě a mechanickým výkonem pohonného motoru by se roztočil na velké otáčky. Aby k tomu nedošlo, musí zapůsobit výkonový regulátor, který uzavře přívod energie, a stroj se musí rychle odbudit, aby jeho napětí kleslo.

c) Průměty U_{di} do směru kolmého na fázor napětí U jsou úměrné činnému výkonu a za stálých otáček i momentu M .

d) Bod M_G odpovídá maximálnímu momentu (výkonu) generátoru a představuje *hranici stability*. V oblasti $M_G - K$ nemůže generátor pracovat, neboť zvětšenému zatěžovacímu proudu (U'_{di} , U''_{di}) odpovídá zmenšený výkon (P' , P''), takže stroj přejde okamžitě do zkratu.

e) Bod M_M odpovídá maximálnímu výkonu a momentu motoru.

Zvětšením vnějšího zatížení nad moment M_{Mmax} se proud sice zvětší, ale výkon se zmenší, takže motor se zastaví a prochází jím proud nakrátko.

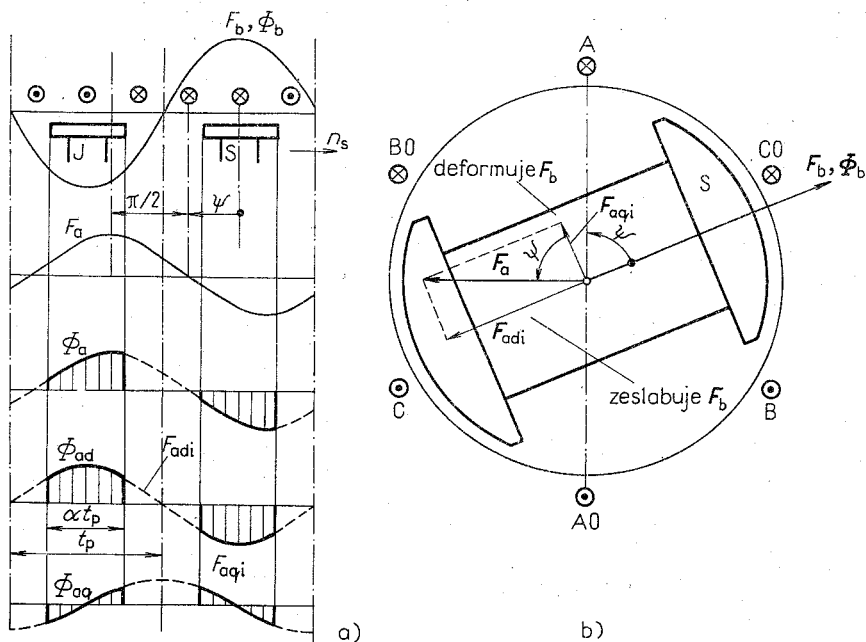
Z diagramu je vidět, že maximální zatížení a přetížitelnost můžeme zvětšit zvětšením buzení (větší průměr kružnice). Trvalé zatížení je ale omezeno dovoleným zatížením statorového vinutí.

4.3.8. Reakce kotvy stroje s vyjádřenými póly

Průběh reakčního magnetického toku Φ_a u stroje s vyjádřenými póly pro $q = 1$, který pracuje jako indukční generátor, je na obr. 164a.

Předpokládáme sinusový průběh magnetického toku pólů. Magnetický tok pólů předbíhá drážku s maximálním proudem o úhel ψ . Osa severního pólu reakčního magnetomotorického napětí F_a se zpožďuje za osou severního pólu magnetů o úhel $\pi/2 + \psi$ a jeho orientace vychází z rozložení statorového proudu. Reakční magnetický tok Φ_a nesleduje průběh F_a , neboť magnetický odpor není po celém obvodu stejný.

V prostoru mezi pólovými nástavci je vzduchová mezera tak velká, že magnetický odpor můžeme považovat za nekonečný a reakční magne-



Obr. 164. Reakce kotvy synchronního stroje s vyjádřenými póly

tické pole je zde nulové. Pod pólovými nastavci předpokládáme stejnou vzduchovou mezeru, takže v rozpětí αt_p sleduje reakční magnetický tok průběh reakčního magnetomotorického napětí.

Reakční magnetický tok Φ_a je tedy velmi deformován, sinusovce se vůbec nepodobá, takže ho nemůžeme jednoduchým způsobem sčítat vektorově s tokem magnetů.

Proto se reakční magnetomotorické napětí F_a podle obr. 164b rozkládá na složku podélnou

$$F_{adi} = F_a \sin \psi \quad (317)$$

a na složku příčnou

$$F_{aqi} = F_a \cos \psi \quad (318)$$

Príslušné složky reakčního magnetického toku Φ_{ad} a Φ_{aq} se vyvinou jen v prostoru pod pólovými nastavci. Podélný reakční tok působí v ose hlavních pólů a jejich magnetický tok zmenšuje, neboť pod severním

pólem magnetů vychází jižní pól reakčního magnetického toku. Podélný reakční magnetický tok má osu mezi sousedními póly (F_{aqi} je kolmé k F_b), takže pod každým pólem magnetů je stejná část jeho severního a jižního pólu. Příčný reakční magnetický tok nemění tedy velikost výsledného magnetického toku, jen ho vysouvá ve směru F_{aqi} .

Deformované složky reakčního magnetického toku nahradíme jejich prvními harmonickými (obr. 164a). Poměr jejich amplitudy k amplitudě magnetického toku u hladkého rotoru se vyjadřuje deformačními činiteli κ_d, κ_q .

Velikost *deformačních činitelů* závisí na pólovém krytí, na tvaru vzduchové mezery a na magnetické indukci obvodu. Zjišťují se z grafů sestrojených různými autory.

Pro normální poměry bývá

$$\kappa_d = 0,8$$

$$\kappa_q = 0,3$$

Aby bylo možné nakreslit fázorový diagram stroje s vyjádřenými póly, nahradíme skutečné deformované složky reakčního magnetického toku deformovanými složkami reakčního magnetomotorického napětí

$$F_{ad} = \kappa_d F_{adi} = \kappa_d F_a \sin \psi \quad (319)$$

$$F_{ad} = \kappa_d 2,7I \frac{N_s}{p} k_v \sin \psi$$

$$F_{aq} = \kappa_q F_{aqi} = \kappa_q F_a \cos \psi \quad (320)$$

$$F_{aq} = \kappa_q 2,7I \frac{N_s}{p} k_v \cos \psi$$

Úplný fázorový diagram je na obr. 165.

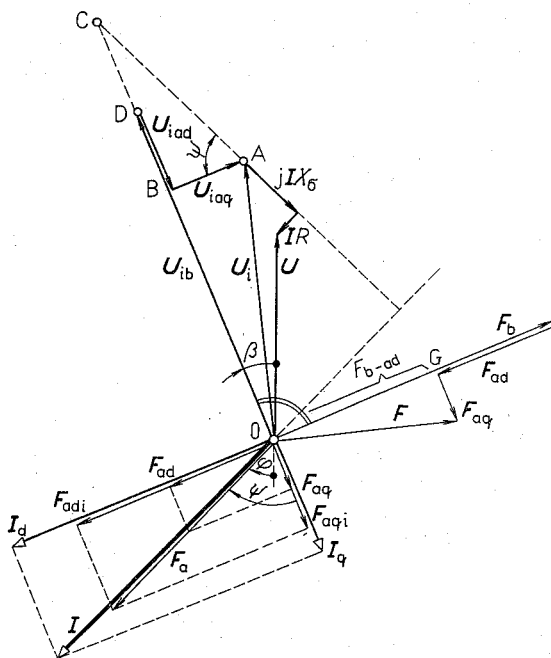
Vliv reakce kotvy na velikost napětí U_i vyjadřují fiktivní reakční úbytky napětí

$$U_{iad} = jX_{ad}I_d \quad U_{iaq} = jX_{aq}I_q$$

kde X_{ad} je *podélná reaktance* reakce vinutí statoru,

X_{aq} *příčná reaktance* reakce vinutí statoru.

Určení magnetomotorického napětí pro stroj s vyjádřenými póly je uvedeno ve III. díle učebnice.



Obr. 165. Fázorový diagram indukčně zátženého alternátoru s vyjádřenými póly

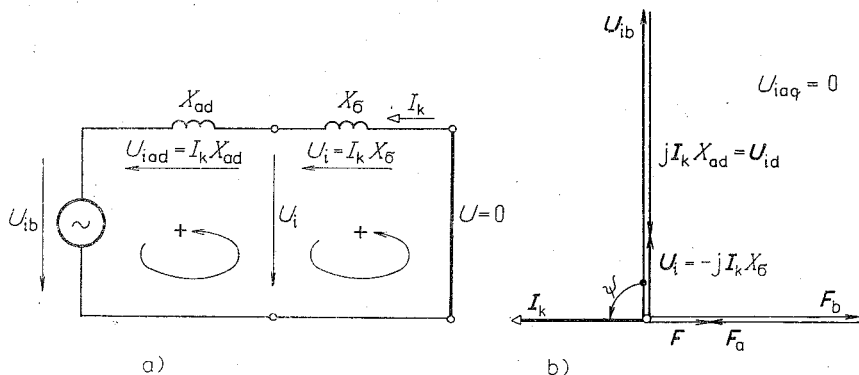
4.3.9. Chod nakrátko

Ustálený (trvalý) proud nakrátko by se dal určit přímým měřením tak, že zkratovaný generátor by se roztočil a postupně nabudil až na jmenovitou hodnotu budícího proudu.

Při zanedbání činného odporu vinutí je v obvodu náhradního schématu (obr. 166a) zapojena jen reakční a rozptylová reaktance X_{ad} a X_{σ} . Proud nakrátko je tedy indukční a je proti napětí U_{ib} posunut o úhel $\psi = \pi/2$. Jím vybudzený reakční tok působí přesně v ose pólů a je orientován tak, že zeslabuje tok magnetů.

Protože při chodu nakrátko je napětí $U = 0$, musí být reakční tok tak velký, aby výsledný tok indukoval jen malé napětí U_i potřebné ke krytí úbytku napětí na reaktanci X_{σ} . Z náhradního schématu platí

$$\begin{aligned} U_{ib} - U_i + jX_{ad}I_k &= 0 \\ U_i &= U_{ib} + jX_{ad}I_k = U_{ib} + U_{iad} \end{aligned} \quad (321)$$



Obr. 166. Synchronní stroj při chodu nakrátko
 a) zjednodušené náhradní schéma, b) fázorový diagram

nebo

$$\begin{aligned} U_i + jX_\sigma I_k &= 0 \\ U_i &= -jX_\sigma I_k \end{aligned} \quad (322)$$

Výsledné magnetomotorické napětí ve stroji při chodu nakrátko je velmi malé, výsledný magnetický tok je také velmi malý a obvod je jen málo sycen ($F = F_b + F_a$). Můžeme tedy odečítat přímo

$$F = F_b - F_a$$

Kdyby neexistoval rozptyl, bylo by napětí $U_i = 0$ a ve stroji by nebyl žádný výsledný magnetický tok. Při chodu nakrátko má stroj jen osové pole.

Ustálený proud nakrátko je tedy poměrně malý.

Poměr proudu nakrátko při buzení proudem nakrátko I_{k0} ke jmenovitému proudu určuje tzv. *poměrný proud nakrátko* (zkratový poměr)

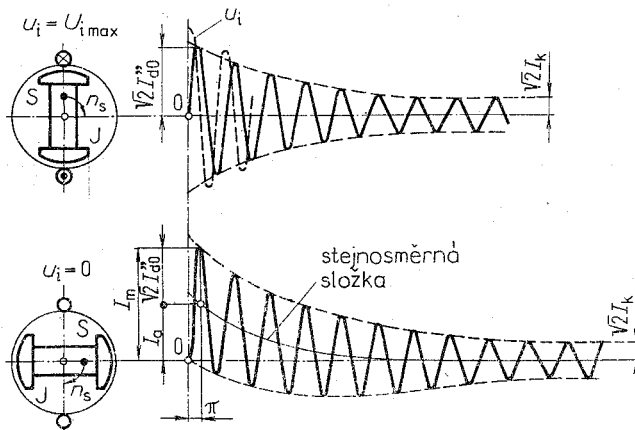
$$i_k = \frac{I_{k0}}{I_n} \quad (323)$$

U strojů s vyjádřenými póly bývá $i_k = 1$ až 1,4, moderní turboalternátory mívají $i_k \approx 0,5$.

Od trvalého proudu nakrátko je třeba rozlišovat *zkratový proud*, kterým rozumíme časově proměnný proud při náhlém spojení vybuzeného alternátoru nakrátko.

V prvním okamžiku zkratu je zkratový proud značně velký, např. až dvacetinásobný, neboť stroj má plné buzení. Jak se vyvíjí reakce kotvy, začne proud postupně klesat až na velikost ustáleného proudu nakrátko.

První náraz zkratového proudu a jeho průběh je v každé fázi jiný a závisí na tom, v kterém okamžiku zkrat nastal.



Obr. 167. Průběh zkratového proudu alternátoru

Dva krajní případy jsou vyznačeny na obr. 167.

a) Zkrat nastal ve chvíli, kdy se ve vinutí uvažované fáze indukuje maximální napětí $U_{i \max} = \sqrt{2} U_i$. Celkový magnetický tok, spřažený s vinutím fáze, je nulový. Indukční zkratový proud musí tedy začínat v nule. Tzv. počáteční nárazový zkratový proud dosáhne jen maxima, které je dáno buzením a vnitřní impedancí

$$\sqrt{2} I''_{d0} = \frac{\sqrt{2} U_i}{Z} \quad (324)$$

Reakcí se tento proud postupně utlumí až na proud I_k .

b) Nejnepríznivější případ nastane, když ke zkratu dojde ve chvíli, kdy je vinutí uvažované fáze spřaženo s plným magnetickým tokem a indukované napětí je nulové.

Zkratový proud, zpoždující se za indukovaným napětím o $\pi/2$, by měl v okamžiku zkratu najednou dosáhnout velikosti $-\sqrt{2} I''_{d0}$. To však není možné, musí opět začínat z nuly, a proto se musí ve vinutí

indukovat *stejnoseměrná složka*

$$I_a = + \sqrt{2} I''_{d0} \quad (325)$$

kteřá průběh zkratového proudu vysune nad osu tak, že po uplynutí polo-
viční doby kmitu (π) dosáhne tzv. *nárazový* (dynamický) *zkratový proud*
velikosti

$$I_m = 2 \frac{\sqrt{2} U_i}{Z} = 2 \sqrt{2} I''_{d0} \quad (325)$$

kteřá je dvojnásobně větší než v prvním případě.

Trvalý proud nakrátko namáhá vinutí tepelně, a proto musí být co
nejrychleji vhodně nastavenými ochranami odpojen.

4.4. MOMENT SYNCHRONNÍHO STROJE

4.4.1. Moment stroje s hladkým rotorem

Jako u každého točivého stroje platí

$$M = 9,55 \frac{m}{n_s} UI \cos \varphi \quad [\text{Nm}; \text{min}^{-1}, \text{V}, \text{A}] \quad (326)$$

U generátoru je to moment, který musí vytvářet pohonný motor
pro vytvoření elektrického výkonu $UI \cos \varphi$, u motoru je to moment, který
se po odečtení mechanických ztrát získá na jeho hřídeli.

Podle předcházejícího výkladu přísluší každému zatížení stroje určitý
zátěžný úhel β . Závislost momentu na tomto úhlu lze vyjádřit pomocí
zjednodušeného fázorového diagramu podle obr. 168a, jemuž odpovídá
zjednodušené náhradní schéma na obr. 160.

Z diagramu vychází

$$X_d I \cos \varphi = U_{ib} \sin \beta \quad (327)$$

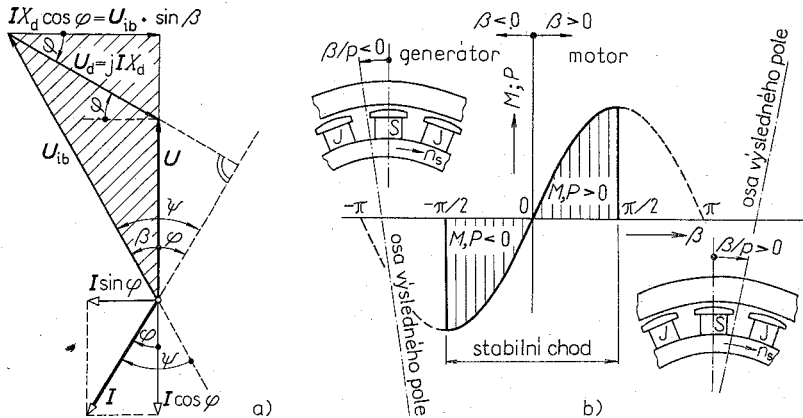
$$I \cos \varphi = \frac{U_{ib}}{X_d} \sin \beta \quad (328)$$

takže po dosazení do rovnice (326) dostaneme

$$M = 9,55 \frac{m}{n_s} U \frac{U_{ib}}{X_d} \sin \beta \quad (329)$$

Je vidět, že při stálém buzení ($U_{ib} = \text{konst}$) a při stálém napětí moment závisí na $\sin \beta$, kde β je zatěžovací úhel. Stejně se mění i výkon (obr. 168b). Chodu naprázdno ($\beta = 0$) odpovídá nulový moment.

U generátoru předbíhá magnetové kolo osu výsledného magnetického toku ve stroji, takže úhel β , a tedy i moment, je záporný.



Obr. 168. Moment synchronního stroje s hladkým rotorem

a) fázorový diagram pro výpočet momentu, b) průběh momentu v závislosti na zatěžovacím úhlu

U motoru se magnetové kolo zpožďuje za výsledným magnetickým tokem, zátěžný úhel a moment je kladný, což souhlasí se spotřebitelským systémem.

S rostoucím zátěžným úhlem se moment motoru i generátoru zvětšuje až na maximální moment M_{\max} , odpovídající úhlu $\beta = \pi/2$

$$M_{\max} = 9,55 \frac{m}{n_s} U \frac{U_{ib}}{X_d} \quad (330)$$

Až po tento moment pracuje synchronní stroj *stabilně*.

Zvětší-li se u motoru mechanické zatížení tak, že zátěžný úhel přesáhne $\pi/2$, jeho elektromagnetický tah klesne, motor se zastaví a přejde do chodu nakrátko.

Dodá-li se generátoru pohonným motorem moment větší než je M_{\max} , poruší se rovnost sil, úhlu $\beta > \pi/2$ odpovídá menší moment elektromagnetických sil, takže přebytkem dodávaného momentu se stroj roztočí na velké otáčky a ztratí synchronismus. Přestane pracovat jako generátor a sám začne ze sítě odebírat velký proud. Regulační přístroje musí stroj rychleji odpojit.

Mírou *statické stability* je přitížitelnost daná poměrem

$$\frac{M_{\max}}{M_n} = \frac{P_{\max}}{P_n} = \frac{9,55 \frac{m}{n_s} U \frac{U_{ib}}{X_d} \cdot 1}{9,55 \frac{m}{n_s} U \frac{U_{ib}}{X_d} \sin \beta_n} = \frac{1}{\sin \beta_n} \quad (331)$$

4.4.2. Moment stroje s vyjádřenými póly

Odvození momentu je složitější, neboť vliv reakce a rozptylu nemůžeme u stroje s vyjádřenými póly nahradit jedinou reaktancí. Magnetický odpor obvodu reakčního magnetického toku je v podélné i příčné ose různý, a proto musíme rozlišovat *synchronní podélnou reaktanci*

$$X_d = X_{ad} + X_\sigma \quad (332)$$

a *synchronní příčnou reaktanci*

$$X_q = X_{aq} + X_\sigma \quad (333)$$

Přitom předpokládáme, že rozptylová reaktance je v každém směru stálá.

S ohledem na magnetické odpory v podélné a příčné ose je $X_d > X_q$.

Podrobným rozбором lze potom dokázat, že moment stroje s vyjádřenými póly je dán vztahem

$$M = 9,55 \frac{m}{n_s} U \frac{U_{ib}}{X_d} \sin \beta + 9,55 \frac{m}{n_s} U^2 \frac{X_d - X_q}{2X_d X_q} \sin 2\beta = M_s + M_r \quad (334)$$

Moment stroje s vyjádřenými póly má dvě složky:

a) *synchronní moment* M_s , který je stejný jako u stroje s hladkým rotorem a který závisí na buzení a na $\sin \psi$,

b) *reakční moment* M_r , který se mění v závislosti na $\sin 2\omega t$ (druhá harmonická), jehož velikost závisí na rozdílu podélné a příčné reaktance a vůbec nezávisí na buzení.

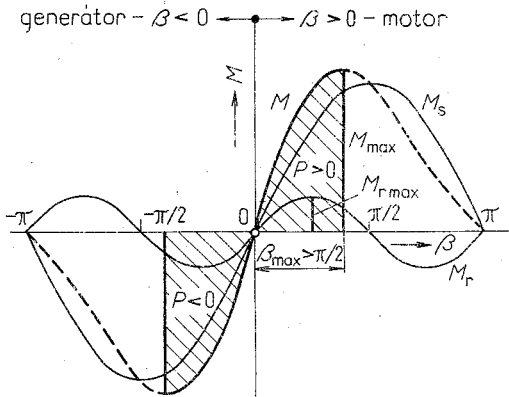
U hladkého rotoru je $X_d = X_q$, tedy $X_d - X_q = 0$ a reakční moment je nulový.

Výsledný moment stroje s vyjádřenými póly je dán součtem obou složek (obr. 169).

Moment zvratu je větší než u stroje s hladkým rotorem, ale nastane při úhlu $\beta < \pi/2$.

Působením reakčního momentu by se roztočený motor udržel v chodu i při vypnutém buzení, pokud by jeho zatížení nepřestoupilo moment $M_{r\max}$ a zátěžný úhel velikost $\pi/4$.

Na jeho principu pracuje *reakční synchronní motor*.



Obr. 169. Moment synchronního stroje s vyjádřenými póly v závislosti na zátěžovacím úhlu

4.5. ŘÍZENÍ NAPĚTÍ

4.5.1. Řízení napětí u strojů s budičem

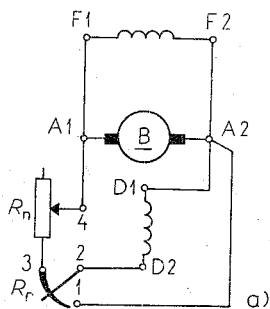
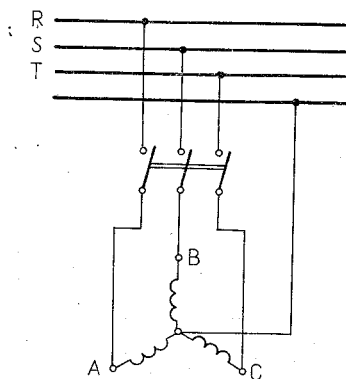
Napětí samostatně pracujícího generátoru se řídí změnou budičeho proudu ručním nebo samočinným regulátorem.

Ruční regulátor malých strojů může být zařazen přímo v budičím obvodu alternátoru, výhodnější je však zapojení v obvodu budičeho vinutí budiče, neboť regulátor vyjde potom menší a lépe ovladatelný (obr. 170a). Budičím proudem alternátoru se tak nepřímou změnou svorkového napětí budiče.

Má-li se dodržet stálé napětí, je nutné regulátor nastavovat při každé změně zatížení. Stroj pro ruční regulaci musí být tvrdý, aby se zatížením měnil jen málo své napětí.

Základní napětí alternátoru můžeme nastavit proměnným odporem R_n , který je zapojen do série s derivačním regulátorem.

Samočinné regulátory musí být provedeny tak, aby rychle reagovaly i při malé ovládací síle. Ovládání obstarává vhodný systém napájený regulovaným napětím. Novější regulátory bývají doplněny kompaundovacím zařízením, jímž se stroj přibuzuje i v závislosti na zatěžovacím proudu a jeho účinníku, aby se zvýšeným napětím kryly i úbytky napětí v síti, a tak se udržovalo stálé napětí na spotřebičích i při změně charakteru zátěže.

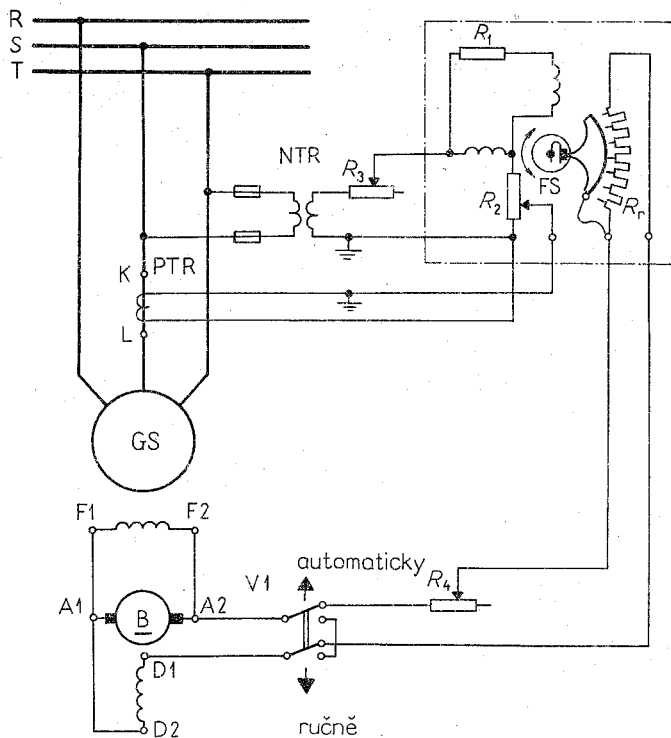


Obr. 170. Nepřímé ruční napětí alternátoru

B – budič, R_r – derivační regulátor,
 R_n – nastavovací odpor

V praxi se používají dva druhy samočinných regulátorů napětí:

I. Velmi rozšířené jsou samočinné odvalovací rychloregulátory BBC (patent z roku 1908). Regulační odpor se mění vhodně profilovaným segmentem, který se působením točivého indukčního systému natáčí a odvaluje po válcové ploše, vytvořené větším počtem odizolovaných kontaktů, na něž jsou připojeny odbočky regulačního odporu (obr. 171).



Obr. 171. Zapojení rychloregulátoru BBC s kompaundací

V1 – přepínač pro ruční řízení, NTR – napěťový transformátor, PTR – proudový transformátor, FS – Ferrarisův indukční systém regulátoru, R_1 – odpor pro posun fáze ve vinutí indukčního systému, R_2 – vyrovnávací odpor kompaundace, R_3 – nastavovací reostat, R_r – řídicí odpor, přepínaný odvalovacím kontaktem regulátoru

Kompaundace se dosahuje tím, že Ferrarisův indukční systém regulátoru je napájen jednak v závislosti na napětí alternátoru (přístrojový transformátor napětí NTR) a jednak v závislosti na zatěžovacím proudu (přes přístrojový transformátor proudu PTR).

2. Rychloregulátor Tirrill (ZPA n. p.) pracuje tak, že vhodným řídicím systémem periodicky zkratovává části regulačního odporu v buďicím obvodu dynama v závislosti na nastavené velikosti napětí alternátoru.

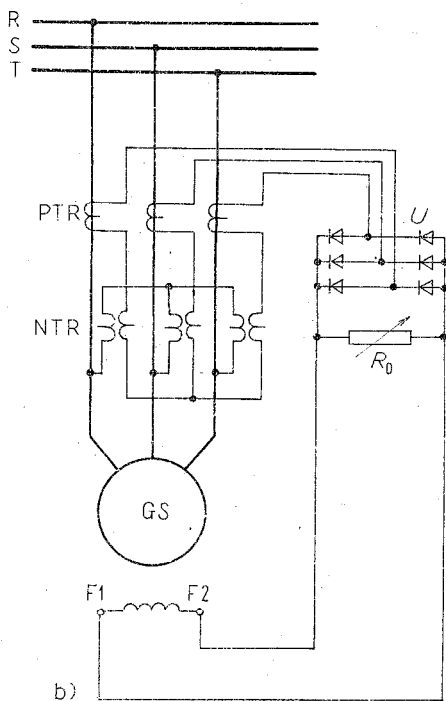
4.5.2. Buzení synchronních strojů napájené z neřízeného usměrňovače

Pokud byly k dispozici jen neřízené polovodičové (křemíkové) diody, bylo možné uskutečňovat řízení jen na střídavé straně.

Užívaly se dva způsoby buzení:

1. Buzení s fázovou kompaundací bez budiče.
2. Bezkrůžkové stroje s pomocným střídavým generátorem.

Používaly se především u strojů malých a středních výkonů. Bezkrůžkové stroje jsou zvláště vhodné pro větší otáčky, kdy pomocný generátor vychází menší.



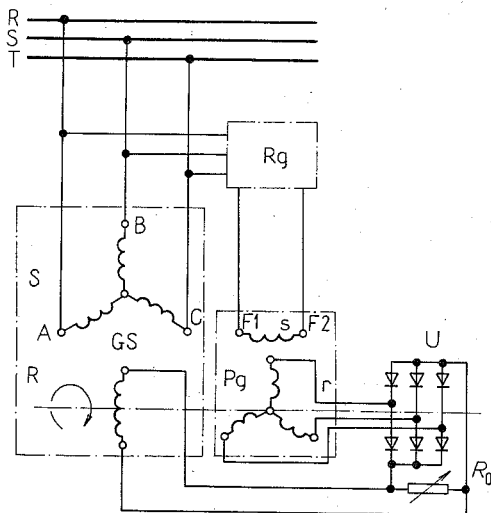
Obr. 172. Buzení alternátoru s fázovou kompaundací přes usměrňovač bez regulátoru U – statický polovodičový usměrňovač, PTR – proudový transformátor, NTR – napěťový transformátor, R_0 – ochranný a nastavovací odpor

Kompaundní buzení (obr. 172) zajišťuje statický usměrňovač, napájený ze střídavé strany alternátoru přes napěťové a proudové transformátory tak, že jeho výstup je ovládán svorkovým napětím alternátoru, zatěžovacím proudem a zároveň i fázovým posunem. Souprava zajišťuje

samočinnou regulaci napětí s přesností $\pm(1 \text{ až } 3)\%$ při změně zatížení od 0 do 100 % a při změně účinníku v rozsahu 0 až 1.

Schéma bezkroužkového alternátoru je na obr. 173.

Zdrojem budicího výkonu je jednoduchý střídavý pomocný generátor Pg. Jeho trojfázové kotvové vinutí (r) je uloženo na společném hřídeli s rotorem alternátoru, jehož budící vinutí napájí trojfázový usměrňovač U v můstkovém zapojení. Diody usměrňovače jsou unášeny rotorem, takže stroj nemá ani komutátor, ani kroužky.



Obr. 173. Schéma bezkroužkového synchronního stroje s rotujícím usměrňovačem

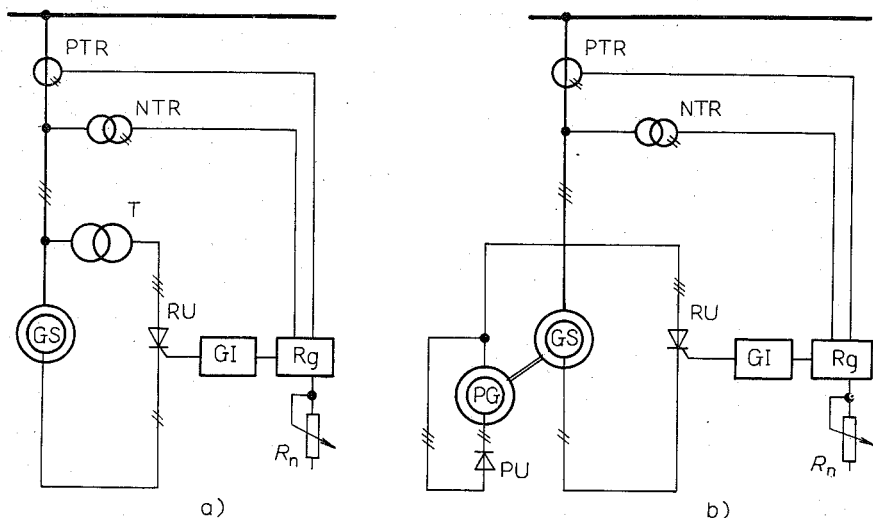
GS – synchronní alternátor,
S – satorové vinutí, R – rotor alternátoru – budící vinutí,
Pg – pomocný alternátor,
s – budící vinutí pomocného alternátoru, r – rotující kotva pomocného alternátoru, U – rotující polovodičový usměrňovač,
Rg – regulátor řízený napětím na střídavé straně alternátoru,
R₀ – ochranný a nastavovací odpor

Budící vinutí pomocného generátoru tvoří jeho stator (alternátor v opačném provedení) a je napájeno ze svorek alternátoru přes rychloregulátor Rg.

4.5.3. Buzení velkých alternátorů napájené z řízeného usměrňovače

Zavedení tyristorů umožnilo zjednodušit a zkvalitnit plynulou samočinnou regulaci alternátorů i těch největších výkonů.

Jsou možná různá zapojení s různými speciálními vlastnostmi. Nejběžnější druhy jsou vyznačeny v jednopólových schématech na obr. 174.



Obr. 174. Typické způsoby moderní regulace napětí velkých alternátorů řízených tyristorovým usměrňovačem

a) řízený usměrňovač napájený z výstupních svorek alternátoru, b) řízený usměrňovač napájený z pomocného alternátoru

GS – alternátor, RU – řízený tyristorový usměrňovač, GI – generátor řídicích impulsů, Rg – samočinný regulátor, T – transformátor řízeného usměrňovače, PG – pomocný generátor, PU – pomocný usměrňovač pro buzení pomocného generátoru, R_n – nastavovací odpor

Budicí vinutí je napájeno z řízeného tyristorového usměrňovače (RU). Řízení obstarává generátor řídicích impulsů GI, ovládaný rychloregulátorem Rg v závislosti na napětí alternátoru a jeho zátěže.

Řízený usměrňovač je napájen buď ze svorek alternátoru přes převodový a izolační transformátor T (obr. 174a), nebo z jednoduchého střídavého pomocného generátoru PG (obr. 174b).

4.6. PROVOZ ALTERNÁTORŮ

4.6.1. Samostatně pracující alternátor

Alternátor, který sám napájí rozvodnou síť, se spouští tak, že se při vypnutém buzení roztočí poháněcím motorem přibližně na synchronní otáčky. Potom se regulátorem buzení nabudí na jmenovité napětí a hlavním

vypínačem se připojí k síti. Otáčky se kontrolují kmitoměrem a napětí voltmetrem.

Podle okamžitého zatížení činným výkonem se musí přívod energie (voda, pára, plyn, nafta) nastavit tak, aby se udržovaly synchronní otáčky, potřebné pro udržení kmitočtu. Při změnách zatížení by se pohonný stroj rozbíhal nebo přibrzdil a kmitočet by nebyl stálý. Proto musí mít alternátor zvláštní odstředivý regulátor, jímž se otáčky samočinně udržují. Odstředivý regulátor nebo vhodný tachogenerátor uzavírá nebo otevírá prostřednictvím servomotoru přívod energie.

Při náhlém odlehčení, např. při odpojení zkratu, má pohonný motor snahu proběhnout, roztočit se na průběžné otáčky. Regulátor musí zapůsobit tak rychle, aby nedošlo k poškození zařízení.

Regulátorem buzení se udržuje jen napětí na svorkách generátoru nebo v případě kompaundace i na svorkách spotřebiče.

Jalový výkon dodávaný strojem do sítě závisí jen na okamžitých poměrech v něm. Účinník nelze zlepšit zvětšením buzení. Kdyby se při stejné zatíženém alternátoru zvětšilo buzení, zvýšilo by se jeho napětí, což není přípustné.

Úmyslně se odstaví generátor tak, že se odpojí od sítě a odbudí. Velké alternátory je třeba i zabrzdít, aby se nenamáhala ložiska, která se při malých otáčkách dostatečně nemažou. Brzdit se může mechanicky nebo elektricky. Rotory velkých hydroalternátorů se po zabrzdění hydraulickými zdviháky nadzvednou, aby se odlehčilo jejich závěsné ložisko.

Aby se vyloučilo náhlé zvýšení napětí po odlehčení generátoru, jsou v budícím obvodu zapojeny *samočinné odbuzovače*, které zabezpečí co nejrychlejší zánik energie magnetického pole rotoru a současně vyloučí vznik přepětí v jeho budícím vinutí.

4.6.2. Paralelní chod alternátorů

Z energetických důvodů (spolehlivé zabezpečení dodávky energie, udržování napětí, kmitočtu, kompenzace účinníku) pracují dnes všechny alternátory i v těch nejmenších výrobnách paralelně do společné sítě.

Podmínky paralelní spolupráce jsou:

1. stejné jmenovité napětí,
2. stejný kmitočet,
3. stejný sled fází.

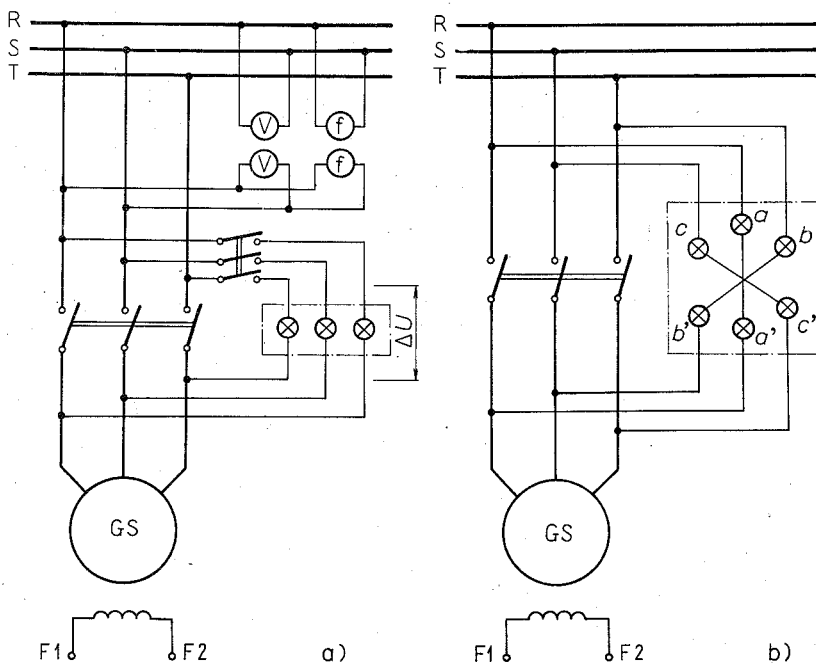
Generátory s nestejným svorkovým napětím spolupracují paralelně přes blokové transformátory.

Obvykle je třeba spouštěný alternátor (a stejně i synchronní motor) paralelně připojit k síti, která je už napájena jinými alternátory.

Stejný sled fází se kontroluje jen při prvním připojení. K tomu slouží ukazovatel sledu fází, který pracuje na principu točivého magnetického pole.

Aby při zapnutí alternátoru na síť nenastal proudový ani mechanický náraz, musí se připojení uskutečnit v okamžiku, kdy se fázové hodnoty napětí sítě a generátoru rovnají a kdy mají stejnou fázi. Říkáme, že generátor musí být se sítí sfázován, to znamená, že průběhy napětí musí v okamžiku připojení splývat.

Pochod, kterým se nastaví všechny podmínky paralelního chodu, se nazývá fázování nebo synchronizování.

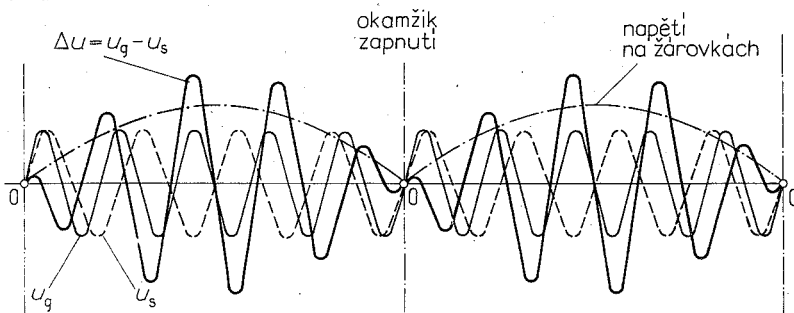


Obr. 175. Fázování synchronních strojů
a) zapojení „na tmou“, b) zapojení „na světlo“

a) *Rovnost napětí* se zjistí dvěma voltmetry (obr. 175) nebo jediným voltmetrem se dvěma ukazovateli. Nastaví se regulováním buzení fázovaného stroje.

b) *Rovnost kmitočtů* se kontroluje dvěma kmitoměry a nastavuje se změnou otáček pohonného motoru (regulováním přívodu energie). Podle kmitoměrů se rovnost kmitočtů dá jen přibližně nastavit.

c) Co nejmenší rozdíl v kmitočtech a zároveň *shodnost fází* se určí nejjednodušeji fázovacími žárovkami, zapojenými např. podle obr. 175a na tmu.



Obr. 176. Průběh napětí na fázovacích žárovkách

Fázovací žárovky se rozsvěčují a zhasínají rozdílem napětí generátoru a sítě. Jsou-li kmitočty obou napětí jen málo rozdílné, rozsvěčují se a zhasínají tak, že svým světlem sledují efektivní hodnotu rozdílu obou napětí (obr. 176). Kmitání světla je tím pomalejší, čím je menší rozdíl obou kmitočtů.

Při fázování se rychlost pohonného motoru nastavuje tak, aby zhasínání žárovek kmitalo co nejméně (např. jednou za jednu až dvě sekundy). V okamžiku, kdy najednou zhasnou všechny žárovky, jsou okamžité hodnoty u_g a u_s ve všech fázích stejné a napětí mají stejnou fázi (bod 0 na obr. 176), takže generátor můžeme výkonovým vypínačem připojit bez nárazu k síti.

Fázovací žárovky můžeme nahradit i jediným tzv. *nulovým voltmetrem*, jehož ukazovatel sleduje interferenční kmitočet a správný okamžik ukáže déle trvající nulovou výchylkou.

Při správném sledu fází zhasínají žárovky současně ve všech fázích, takže současně slouží pro jeho kontrolu. Jinak by stačilo zapojení fázovacích žárovek jen v jedné fázi.

Velmi výhodné je zapojení fázovacích žárovek na točivé světlo podle obr. 175b.

Žárovky a—a' jsou zapojeny na tmu, žárovky b—b' a c—c' jsou zapojeny na světlo. V okamžiku synchronismu žárovky a—a' zhasnou, ostatní slabě svítí. Jinak se rozsvěčují a zhasínají tak, že vzniká dojem, jako by světlo po nich do kruhu obíhalo. Tento oběh v jednom nebo ve druhém směru udává, zda fázovaný stroj má větší nebo menší otáčky, než odpovídá kmitočtu sítě, na níž se má stroj připojit.

V centrálech se používají k fázování synchronoskopy, které jsou výhodnější.

V synchronoskopu jsou fázovací žárovky nahrazeny elektromagnetickou indukční soustavou. Její ukazovatel se otáčí jedním nebo druhým směrem podle otáček fázovaného stroje. Při synchronismu stojí a jeho nehybné vychýlení ukazuje rozdíl fází vyrovnávaných napětí.

Zapnutí se uskuteční tehdy, jestliže ručka setrvává co nejdéle ve vyznačené poloze.

Ve velkých centrálech se používají synchronizátory, které celé sfázování a připojení k síti vykonají úplně samočinně.

Alternátor, který byl správně sfázován a připojen k síti, běží zatím naprázdno. Nedodává do sítě žádný proud, ani z ní žádný proud neodebírá, neboť byl vybuzen právě na $U_{ib} = U$ a nemá žádný přebytek napětí, kterým by mohl krýt úbytek napětí $X_d I$.

I když v okamžiku připojení nesouhlasil jeho kmitočet absolutně s kmitočtem sítě, běží dále *synchronně*, neboť je v synchronismu udržován synchronizačním momentem. Kmitočet sítě určuje svými otáčkami největší stroj, který ji napájí.

Přifázovaný generátor se zatíží tak, že zvětšíme přívod energie jeho motoru. Podle přívodu mechanické energie přebírá stroj na sebe větší nebo menší zatížení sítě. Po nastavení základního zatížení se reguluje přívod energie samočinným odstředivým regulátorem shodně s celkovým zatížením sítě.

Pokud jde o tvrdou síť a stroj nemá právě největší výkon, zůstává napětí na svorkách nezměněno i při změně buzení. Při stejném svorkovém napětí, které udržuje v síti největší stroj, se mění změnou buzení jen fázový posun proudu a tím jalový výkon dodávaný do společné sítě. Samočinný regulátor působí nyní jako regulátor tohoto výkonu.

Dodávka jalového výkonu do sítě se reguluje podle okamžitých poměrů v síti.

K narušení paralelního chodu dojde tehdy, jestliže celkové zatížení sítě stoupne nad příkon všech pohonných strojů. Nedostatkem energie se začnou zmenšovat otáčky, snižuje se tím kmitočet a současně i napětí. Aby se síť i nadále udržela v synchronním chodu, musí se část zátěže odpojit nebo se musí rychle přifázovat další jednotka.

4.7. JEDNOFÁZOVÝ ALTERNÁTOR

Používá se jen pro speciální případy, např. pro napájení elektrických tratí s jednofázovou trakcí s kmitočtem 16 2/3 Hz. Pro napájení jednofázových spotřebitelských sítí nevyhovuje, výhodnější je odběr z trojfázové sítě.

Činnost jednofázového generátoru je velmi ovlivněna reakcí kotvy. Reakční magnetomotorické napětí F_a stojí a má zubový průběh. Reakční magnetický tok úměrný odporu vzduchové mezery závisí v každém okamžiku na okamžité poloze pólových nástavců a je velmi deformován. Výsledný magnetický tok je dán otáčejícím se sinusovým tokem magnetů a stojícím, velmi deformovaným a časově proměnným reakčním magnetickým tokem. Jím indukované napětí je značně deformováno vyššími harmonickými.

Časově proměnný výsledný magnetický tok indukuje i v budičím vinutí střídavé napětí, které nepříznivě ovlivňuje činnost budiče.

Činnost jednofázového alternátoru lze zlepšit tlumicím vinutím umístěným v pólových nástavcích.

4.8. SYNCHRONNÍ MOTOR

4.8.1. Vlastnosti

Z hlediska konstrukce není zásadní rozdíl mezi alternátorem a synchronním motorem.

Motory do 1500 min^{-1} jsou s vyjádřenými póly, motory pro 1500 a 3000 min^{-1} jsou konstruovány jako turbomotory s hladkým rotorem.

Z předcházejících rozborů plynou tyto základní vlastnosti synchronního motoru:

1. Má stálé otáčky, které jsou dány počtem pólů a kmitočtem sítě (pokud jeho zatížení nepřekročí mez přetížitelnosti, za níž se zastaví).

2. Sám se nerozběhne, jeho synchronní záběrný moment je nulový

(síla na zmagnetovaný rotor mění svůj smysl s dvojnásobným kmitočtem a masivní rotor, který se nemůže v okamžiku roztočit na synchronní otáčky, je jednou tahán na jednu stranu a jednou na druhou stranu a zůstane stát), takže motor je třeba *cizím momentem roztočit*.

3. Pro vznik magnetického pole potřebuje stroj budič.

4. Nezatěžuje síť jalovým proudem, naopak sám může jalový proud do sítě dodávat.

5. V provozu má větší účinnost než indukční motor stejného výkonu.

6. Neodebírá-li budičí proud ze sítě, ale sám má dostatečně velkou kapacitu budičího proudu, nemusí mít malou vzduchovou mezeru, jaká se naopak vyžaduje u indukčních motorů právě pro zmenšení magnetizačního proudu a tím i zlepšení účinníku. To je výhodné zejména z výrobních důvodů.

7. Velká vzduchová mezera dovoluje otevřené drážky na statoru (pulsací ztráty jsou u větší mezery malé), takže lze použít kvalitní šablonové vinutí, vkládané jednoduše do drážek.

8. Výkon i moment závisí na první mocnině napětí (u indukčního motoru závisí na druhé mocnině napětí), takže motor není citlivý na kolísání napětí.

9. Větší účinnost je zvláště výhodná proto, že synchronní motory se dělají zejména pro větší výkony, u nichž i nejmenší zlepšení účinnosti představuje v celoročním provozu značné úspory.

Nevýhody synchronního motoru jsou:

1. Obtíž se spouštěním. Spouštění lze zautomatizovat, ale zařízení je složité a choulostivé.

2. Malý záběrný moment.

3. Nemožnost regulace otáček. Regulovat lze jen změnou kmitočtu. Motor by musel mít svůj samostatný generátor, což je možné jen ve speciálních případech, např. při pohonu lodního šroubu. Novější je řízení otáček použitím elektronického měniče kmitočtu.

4. Nutnost nového rozběhu a fázování po každém nárazu, který má za následek vypadnutí ze synchronismu.

5. Potřeba budiče. V porovnání s indukčním motorem zdražuje výrobu jen u menších výkonů. Už při výkonech nad 50 kW je rotor indukčního motoru nákladnější než rotor synchronního stroje s budičem. V každém případě je případná vyšší cena vyvážena úsporami jalové energie.

6. Nemožnost rychlé reverzace.

4.8.2. Použití

Na základě svých typických vlastností vyhovuje synchronní motor zejména pro větší pohony, které nevyžadují velký záběrný moment, nevyskytují se v nich nárazy v zatížení, nevyžadují regulaci a reverzaci a nevyžadují časté zastavování a spouštění. Zvláště je výhodný pro pohony, které musí dodržovat stálé otáčky nezávislé na zatížení.

S výhodou se tedy používá pro pohon

- a) velkých motorgenerátorů,
- b) točivých a pístových turbokompresorů (rozbíhají se s otevřenými ventily),
- c) dmychadel pro vysoké pece a ocelárny,
- d) kulových mlýnů v cementárnách a elektrárnách,
- e) vodních čerpadel ve vodárnách a přečerpávacích stanicích, ventilátorů, gumárenských kalandrů,
- f) lodních šroubů apod.

Nověji se synchronní motory začínají používat i pro pohon velkých válcovacích stolic. Momentovou přetížitelnost zabezpečí volba většího typu (předimenzování zde neovlivní účinník jako u indukčních motorů).

4.8.3. Autosynchronní rozběh

Dnes se synchronní motor téměř výhradně spouští autosynchronním, tj. *indukčním rozběhem*.

Motory spouštěné roztáčením se musí k síti přifázovávat stejně jako alternátory.

Pro autosynchronní rozběh slouží rozběhové vinutí, zhotovené stejně jako tlumič generátoru v pólových nástavcích se spojovacími kruhy po obou jejich stranách. Motor připojíme k síti stejně jako indukční a jeho točivé magnetické pole roztočí rotor tak jako klec na téměř synchronní otáčky (zejména spouští-li se nezatížený). Po zapnutí buzení se dostane synchronním momentem do synchronních otáček. Podle zkušenosti stačí na roztočení 95 % n_s .

Za synchronního chodu působí rozběhové vinutí jako tlumič a zne-
možňuje kývání.

Během rozběhu, pokud stroj běží jako indukční, se v budícím vinutí indukuje skluzem, vzhledem k točivému magnetickému poli, nebezpečně vysoké napětí (i několik tisíc voltů), které by mohlo poškodit izolaci.

tohoto budicího vinutí. Proto se musí během rozběhu přes vhodný odpor budicí vinutí zkratovat.

Z tepelných důvodů se nahrazuje tyčové rozběhové vinutí masívními pólóvými nástavci, spojenými po obou stranách kruhy. Ty mají velkou tepelnou kapacitu, netrpí oteplením, ale zhoršují poměry při rozběhu.

U *turbomotorů* je rozběhové vinutí tvořeno bronzovými klíny, uzavíracími rotorové drážky hladkého rotoru.

Oteplení povrchu rotoru nesmí podle zkušenosti překročit 200 K, jinak se může poškodit izolace vinutí v drážkách pod klíny.

Připojením statorového vinutí k síti nastane přechodný proudový náraz, stejně jako při spouštění indukčních motorů. Při *přímém připojení k síti* je u moderních motorů (3,5 až 5) I_n . Záběrný moment přitom bývá (0,5 až 2,5) M_n .

Záběrný proud a záběrný moment můžeme ovlivnit odporem rozběhového vinutí.

Motory do výkonu 1200 kW se obvykle připojují k síti přímo. Jen při velmi tvrdé síti lze vhodně navržený motor připojit přímo k síti i při výkonu nad 1200 kW.

Proudový náraz je nebezpečný nejen pro síť, ale i pro statorové vinutí, které musí být velmi důkladně vyztuženo.

Oteplení při rozběhu omezuje časté spouštění. Pro stroje velkých výkonů udává výrobce počet spouštění nebo přestávku mezi spouštěními.

Zmenšení proudového nárazu můžeme dosáhnout

1. tlumivkami zapojenými do uzlu statorového vinutí, které se po skončení rozběhu zkratují,
2. přepínáním statorového vinutí do hvězdy nebo trojúhelníka,
3. spouštěcím transformátorem,
4. postupným paralelním spojováním větví statorového vinutí.

4.8.4. Reakční synchronní motor

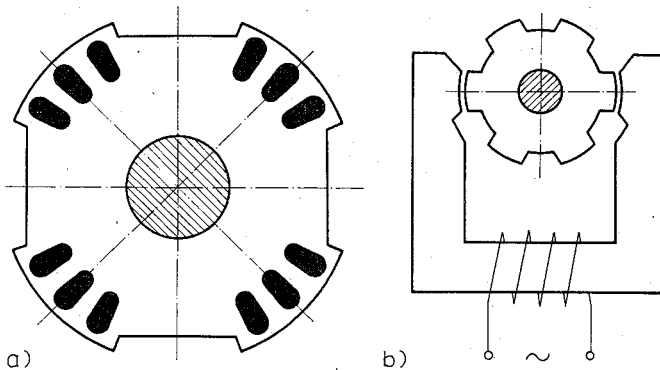
Podle rovnice (334) se roztočený synchronní motor s vyjádřenými póly udrží v chodu i bez buzení působením reakčního momentu

$$M_r = 9,55 \frac{m}{n_s} U^2 \frac{X_d - X_q}{2X_d X_q} \sin 2\beta \quad (335)$$

kteřý závisí na rozdílu magnetických vodivostí v podélné a příčné ose.

Vzniká tím, že točivé pole má snahu vtahovat vyjádřené póly do své osy tak, aby indukční čáry procházely cestou nejmenšího odporu, tzn. osou vyjádřených pólů.

Reakční moment se využívá v *reakčních autosynchronních motorech*, jejichž rotorový svazek má klec a na obvodu tolik mělkých zářezů, kolik pólů vytváří statorové pole (obr. 177a).



Obr. 177. Reakční synchronní motory
a) rotor trojfázového reakčního autosynchronního motoru, b) jednofázový synchronní zubový motorek

Reakční (reluktanční) motory s normálním statorem indukčních motorů se dělají do výkonu 3 kW. Používají se tam, kde se žádají synchronní otáčky při malém zatížení.

Reakčního momentu využívá i tzv. *zubový synchronní motorek*, upravený např. podle obr. 177b. Zuby rotoru se reakčním momentem vtahují do osy stojícího střídavého magnetického pole statoru dvojnásobným kmitočtem, takže

$$n_s = \frac{2 \cdot 60f}{Q} = \frac{120f}{Q} \quad (336)$$

kde Q je počet zubů rotoru.

Statorové pole je buzeno cívkou napájenou jednofázovým proudem. Motorek se sám nerozběhne, musí se roztočit. Točí se na tu stranu, na kterou ho roztočíme.

4.8.5. Selsyny

Selsyny jsou zvláště upravené synchronní stroje, které ve funkci polohových transformátorů slouží pro dálkový přenos otáčivého pohybu.

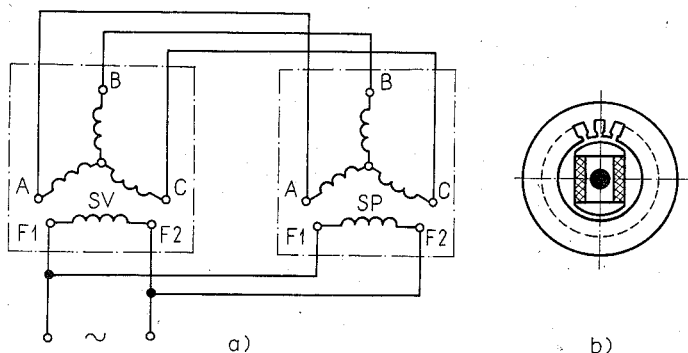
Používají se především při řešení různých úloh v oblasti automatizace, dálkového ovládání a dálkového měření.

Kromě toho se dají použít i k dálkovému přenosu točivého pohybu bez mechanického spojení (pracovní elektrický hřídel), např. k dálkovému ovládání ventilů.

Jednoduché zapojení selsynu je na obr. 178. Skládá se z jednoho vysílače (generátoru – SV) a z jednoho nebo několika přijímačů (motorů – SP). Vysílače i přijímače jsou stejně provedeny. Na statoru mají trojfázové vinutí, dvoupólový (někdy, zejména u větších výkonů čtyřpólový) rotor má vyjádřené póly s budičím vinutím napájeným jednofázově střídavým proudem. Statorové i budičí vinutí jsou spojena paralelně.

Pokud jsou rotory ve stejné poloze, indukují se pulsujícím střídavým magnetickým tokem v obou statorových vinutích stejná napětí, působící proti sobě. Jestliže se jeden rotor natočí, indukuje se v příslušném statorovém vinutí jiné napětí. V paralelním spojení obou statorů vznikne rozdíl napětí, který protlačuje obvodem jistý proud. Jeho působením se pootočí i rotor přijímače do shodné polohy s rotorem vysílače.

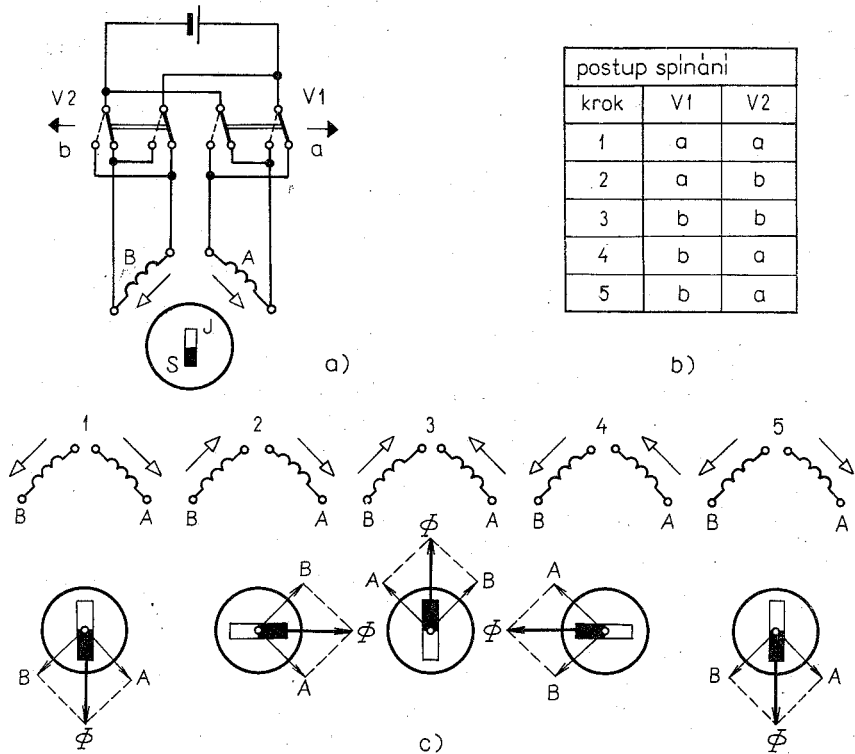
Pro složitější případy se používají důmyslná zapojení selsynů, kombinovaných s jinými pomocnými zařízeními (např. diferenční a můstková zapojení).



Obr. 178. Selsyn

a) schéma jednoduchého zapojení, b) úprava magnetického obvodu

SV – vysílač, SP – přijímač



Obr. 179. Dvoufázový dvoupólový krokový motorek
 a) schéma s mechanickým přepínáním fází, b) postup spínání přepínacích kontaktů,
 c) vysvětlení působení

4.8.6. Krokové motorky

Krokový motorek vykonává funkční pohyb *nespojité*, po stupních, které se nazývají krokem.

Krokové motorky mohou být

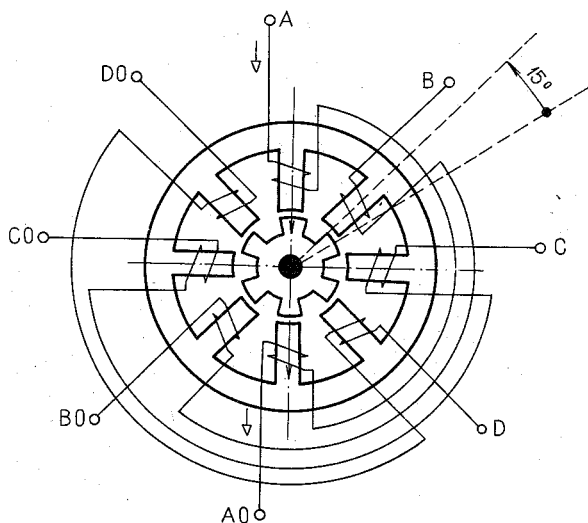
1. jednofázové,
2. dvoufázové,
3. několikafázové, obvykle čtyřfázové.

Jednofázové motorky mají aktivní rotor (opatřený trvalým magnetem) a jedno vinutí. Pohyb rotoru je způsoben přepólováním vinutí. Používá se jich např. pro pohon časových strojů.

Dvoufázové krokové motorky mají také aktivní rotor, ale dvě vinutí.

Na obr. 179a je jednoduché schéma dvoupólového dvoufázového motorku s mechanickým přepínáním smyslu proudu ve vinutí obou fází. Na obr. 179b je vyznačen postup spínání kontaktů a na obr. 179c je vysvětlena činnost motorku.

Podle smyslu proudů ve vinutí se mění poloha osy výsledného magnetického toku Φ . Rotor působením permanentního magnetu zaujme vždy takovou polohu, která souhlasí s polohou osy výsledného magnetického toku. Krok dvoufázového motorku s dvoupólovým rotorem je 90° . Zmenšit ho lze zvětšením počtu pólů. Obvyklou technologií můžeme na rotoru upravit nejvíce dvanáct pólů, takže nejmenší krok dvoufázového motorku je $180/12 = 15^\circ$.



Obr. 180. Uspořádání čtyřfázového krokového motorku, krok 15°

Čtyřfázový (nejčastější) krokový motorek je upraven podle obr. 180. Na satoru má osm vyjádřených pólů, opatřených budicím vinutím a napájených čtyřfázovým proudem. Rotor má šest zubů a působí jako reakční.

Jestliže se v naznačené poloze přivádí proud do vinutí fáze A, ustálí se reakční rotor tak, aby jeho osa s maximální magnetickou vodivostí souhlasila s osou vinutí fáze A.

Osa sousedního zubu je vzhledem k ose vinutí sousední fáze (B nebo D) posunuta o 15° . Přivede-li se proud do jejího vinutí, pootočí se rotor o krok rovnající se 15° .

Zmenšení kroku lze dosáhnout zvětšením počtu statorových pólů a dále jemným drážkováním jejich pólových nástavců s roztečí souhlasící s roztečí stejných drážek na rotoru.

Takto upravené motorčky mají krok 1° až 6° , dynamický moment od několika desetin newtoncentimetrů do několika stovek newtoncentimetrů a rychlost od několika desítek impulsů za sekundu až do několika tisíc impulsů za sekundu.

Rychlé přepínání proudu do jednotlivých fází obstarává *bezkontaktní elektronický ovládač*.

4.9. STŘEDOFREKVENČNÍ GENERÁTORY

Pro napájení moderních indukčních pecí se používá proud o vyšším kmitočtu. Normální alternátory s vyjádřenými póly můžeme použít asi do kmitočtu 250 až 500 Hz. K napájení středofrekvenčních pecí o kmitočtu 250 až 20 000 Hz slouží středofrekvenční alternátory. Ty mohou být provedeny jako homopolární nebo heteropolární.

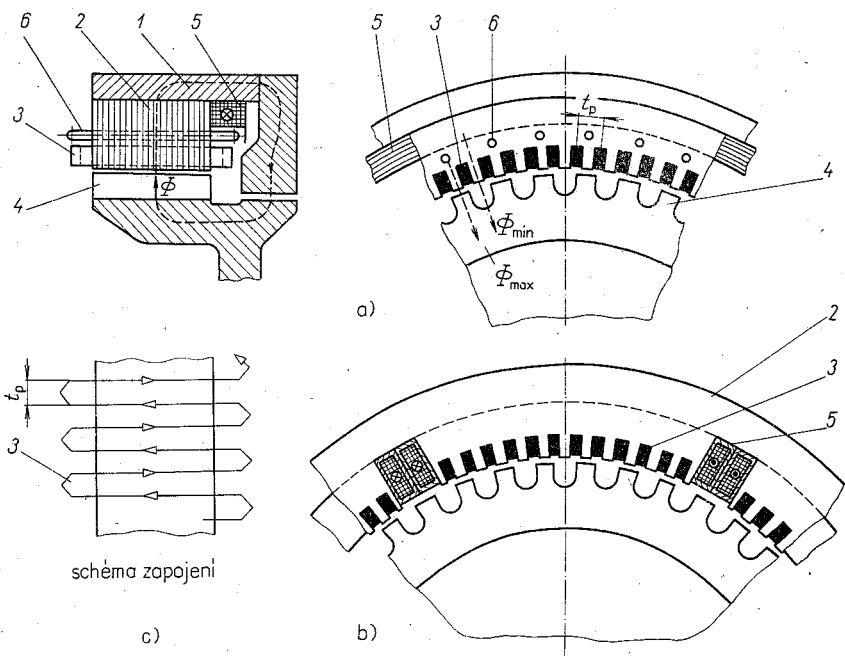
1. Princip homopolárního středofrekvenčního alternátoru je na obr. 181a.

Ve statorovém tělese 1 je uložen statorový svazek 2 z orientovaných plechů, opatřený velkým počtem úzkých drážek, v nichž je uloženo jednofázové pracovní vinutí 3. Skládá se z velkého počtu stejně velkých a do série zapojených cívek, které mají své cívkové strany vždy ve dvou sousedních drážkách.

Rotor je kovaný z ušlechtilé oceli a na svém obvodu má vyfrézované zuby 4, jejichž rozteč je dvakrát větší než rozteč drážek na statoru. Magnetické pole budí jedna kruhová budicí cívka 5, vhodně uložená za statorovým svazkem. Napájena je stejnosměrným proudem z budiče nebo z polovodičového usměrňovače. Magnetické pole se uzavírá obvodem stroje tak, že všemi cívkami prochází vždy ve stejném smyslu. Velikost magnetického toku, který prochází plochou jednotlivých cívek, se mění podle toho, zda se pod nimi právě nachází zub nebo mezera na rotorovém věnci. Magnetický tok v cívkách tedy při otáčejícím se rotoru pulsuje a indukuje v nich napětí o kmitočtu

$$f = \frac{Qn}{60} \quad (337)$$

kde Q je počet zubů na rotoru.



Obr. 181. Středofrekvenční alternátor

a) homopolární stroj, b) heteropolární stroj, c) schéma zapojení pracovních vinutí
 1 – statorové těleso, 2 – statorový svazek, 3 – pracovní vinutí, 4 – zub rotoru, 5 – budící vinutí, 6 – chladič trubky

2. Princip heteropolárního alternátoru je na obr. 181b. Ve statorovém svazku 2 je opět uloženo střídavé jednofázové pracovní vinutí 3, ale současně i rozložené budící vinutí 5, které magnetuje stroj tak, že na jeho obvodu vznikají pásma s různou polaritou. Rotorový věnec 4 opatřený zuby se otáčí a změnou magnetické vodivosti v zubu a drážce mezi nimi způsobuje pulsaci magnetického toku a tím se v pracovním vinutí indukuje napětí. Smysl magnetického toku se při tom nemění.

Statorový svazek, ve kterém vznikají velké ztráty v železe, se chladí soustavou trubek 6, jimiž protéká chladičí voda.

4.10. DRÁPKOVÉ GENERÁTORY

Tyto generátory na výrobu střídavého proudu se používají ve spojení s řízenými polovodičovými usměrňovači především jako pomocné zdroje

na vozidlech, kde nahrazují dosud používaná dynama (palubní generátory motorových vozidel, osvětlovací dynama železničních vagónů, nabíjecí dynama apod.). Ve vozidlech městské dopravy se používají přímo pro napájení osvětlovacích zářivek, bez zvláštního střídače, který je potřebný při jejich napájení z dynama.

Výhody drápkových generátorů jsou

1. Několikrát větší měrný výkon na jednotku objemu; např. osvětlovací dynamo o výkonu 4,5 kW má hmotnost 175 kg, střídavý drápkový generátor stejné hmotnosti má za usměrňovačem výkon 16,5 kW.

2. Generátor nemá komutátor ani kroužky, odpadá starost o jejich náročnou údržbu a nejsou žádné problémy s přechodem proudu sběracím ústrojím.

3. Velký účinník; účinnost lepší než u stejnosměrných generátorů.

4. Možnost širokého řízení napětí, bez choulostivého elektromechanického regulátoru.

5. Jednoduchá a otřesům odolná konstrukce, otáčky motoru jsou omezeny jen vlastnostmi ložisek. Poměr maximálních a minimálních otáček může být až 16 : 1.

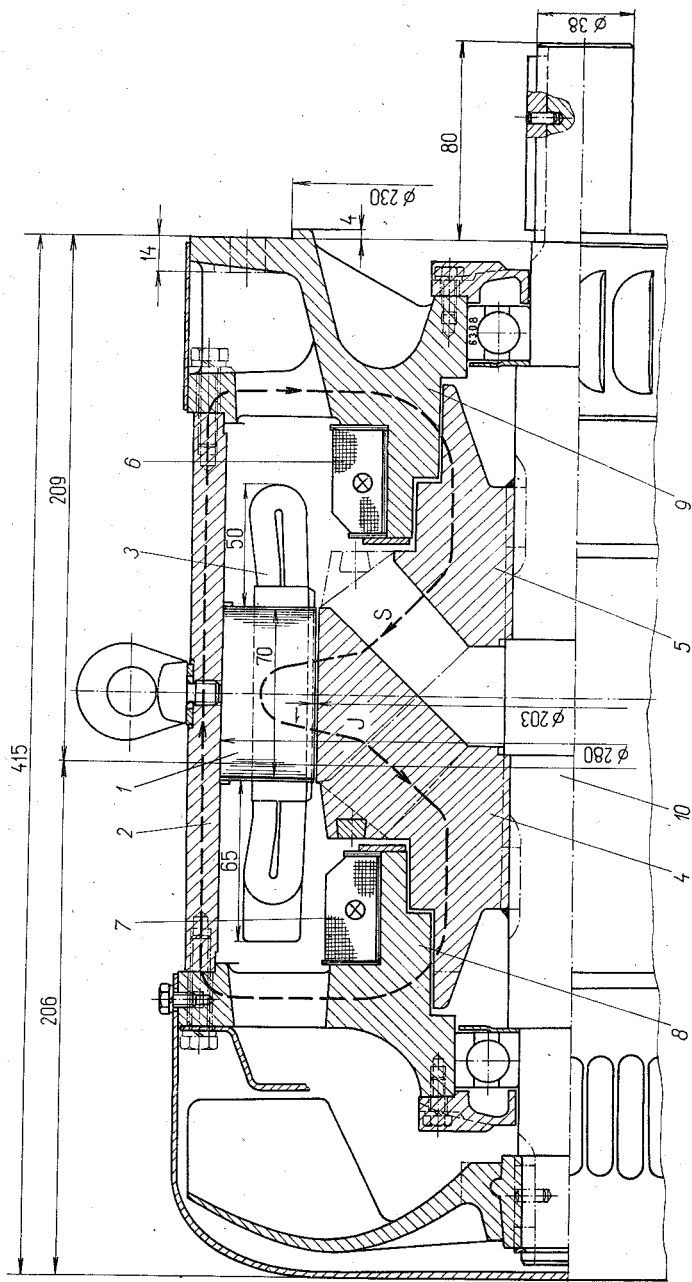
6. Na motorových vozidlech zabezpečuje drápkový generátor s tyristorovým řízením nabíjení baterie i při malých otáčkách, což je důležité zejména v městském provozu (čekání na křižovatkách).

Řez vývojovým typem čs. drápkového trojfázového generátoru 10 kVA, 43 V, 134,3 A, 100 Hz, 1500 min⁻¹ (VÚES Brno) je na obr. 182.

Statorový svazek 1, uložený v masivní kostře 2, má normální trojfázové vinutí 3. Rotor je tvořen dvěma stejnými koly z plného materiálu (4, 5), které mají na svém obvodu výstupky, připomínající drápky. Kola jsou proti sobě pootočená o jednu rozteč, takže drápky do sebe s jistotou vzduchovou mezerou zapadají, a vytvářejí tak po obvodu jakoby vyjádřené póly střídavé polarity. Magnetické pole je buzeno dvěma toroidními cívkami (6, 7), nasazenými na jádrech, jež jsou tvořeny nálitky na předním a zadním ložiskovém štítu (8, 9).

Protože jsou rotorová kola nasazena na nemagnetickém hřídeli (10), musí se magnetický tok uzavírat tak, jak je to na obr. 182 vyznačeno. Střední indukční čára prochází jádry obou budících cívek, tělesem ložiskových štítů a kostrou statoru a uzavírá se statorovým svazkem tak, že z jednoho drápkového pólu vystupuje (S) a do sousedního vstupuje (J). Magnetické pole stojí, otáčí se jen pólový systém, čímž způsobuje pulsaci magnetického toku ve statorovém svazku. Indukované napětí není sinusové, ale to není rozhodující, neboť se stejně v připojeném usměrňovači usměrňuje.

Budící cívka je napájena ze svorek tohoto usměrňovače. Nabuzení je zajištěno remanentním polem nebo u nabíjecích generátorů přímo z dobíjené baterie.



Obr. 182. Trojfázový drápkový generátor 10 kVA, 43 V, 134,3 A, 100 Hz, 150 min⁻¹ (VÚES Brno)
 1 – statorový svazek, 2 – statorová kostra, 3 – statorové trojfázové vinutí, 4, 5 – drápkové rotorové těleso, 6, 7 – budicí cívky, 8 – jeho předního ložiskového štítu, 9 – jeho zadního ložiskového štítu, 10 – nemagnetický hřídel

4.11. KONSTRUKCE SYNCHRONNÍCH STROJŮ S VYJÁDŘENÝMI PÓLY

4.11.1. Všeobecné připomínky ke konstrukci

Statorové vinutí je v zásadě stejné jako u indukčních strojů. Bývá dvouvrstvé se zkráceným krokem. U vinutí vn je problémem odstranění koróny mezi povrchem cívkové strany a vnitřními stěnami drážky, jakož i mezi čely cívek. Koróna je nebezpečná zejména tím, že při ní vzniká rozkladem vzduchu ozón a kysličníky dusíku, které s okolní vlhkostí vytvářejí kyselinu dusičnou. Ta chemicky působí na izolaci, což může vést k jejímu průrazu.

Koróna v drážkách se vyloučí polovodivým nátěrem povrchu cívkové strany. Používá se vhodný lepicí lak asi s 35% přísadou grafitu. Polovodivý nátěr se stane ekvipotenciální plochou s potenciálem shodným s potenciálem železa, jehož se dotýká, takže napěťový spád mezi povrchem cívky a železem zanikne.

Čela se pro potlačení koróny natírají odporovým nátěrem s různou přísadou křemíkového karbidu.

Statorový svazek je proveden stejně jako u indukčních strojů. U velkých průměrů je složen ze segmentů a pro usnadnění dopravy je rozdělen na dvě i čtyři rozebíratelné části. Velkou pozornost je třeba věnovat stažení statorových plechů. Stahovací postranice jsou složeny z několika dílů, stahovací svorníky jsou nejen na vnějším okraji plechů, ale často jdou i středem statorového jha. Zuby se stahují prostřednictvím litých mosazných hřebenů.

Budící vinutí vyjádřených pólů menších strojů bývá z kruhového nebo profilového vodiče opředeného sklem nebo bavlnou. Větší stroje mají vinutí z neizolovaných měděných pásů, nebo nověji z eloxovaných hliníkových pásů. Jednotlivé závity jsou proloženy slídovými nebo mikanitovými pásky. Pásky se obvykle vinou navysoko, čímž se zajistí dobré chlazení holými stěnami pásů. Kromě toho pás navysoko dobře odolává tangenciální složce odstředivé síly. U větších strojů se musí tangenciální složka zachytit zvláštními rozpěrkami.

Póly strojů s menší vzduchovou mezerou a s otevřenými drážkami jsou se zřetelem k povrchovým ztrátám pulsací magnetického toku zhotovené z dynamových plechů. K magnetovému kolu se připevňují

šrouby zašroubovanými do ocelové lišty, vložené do otvoru v jejich tělese, nebo se přípevní pomocí rybiny.

Někdy je výhodnější zhotovit masivní pól a pro zmenšení pulsačních ztrát vyrobít z dynamových plechů jen pólový nástavec.

Masivní póly se mohou použít při menších magnetických indukcích, při větších vzduchových mezerách nebo se mohou použít u polozavřených drážek, kdy jsou ztráty způsobené pulsací malé. Těleso pólu nebo jen pólový nástavec se upevňují u menších obvodových rychlostí šrouby. U větších obvodových rychlostí je upevnění pólů velkým pevnostním problémem.

Menší póly pomaloběžných strojů mají kruhový průřez, který dává nejmenší spotřebu vodičů při stejném účinku.

Chlazení strojů s vyjádřenými póly nepůsobí větší potíže, neboť k chlazení přispívá i ventilační účinek samotných pólů. Malé a střední stroje mívají radiální odstředivý ventilátor s jednostranným větráním. Volnoběžné stroje mívají lopatky ventilátoru přípevněné přímo na obou stranách magnetového kola.

Od výkonu 600 až 1000 kVA se chlazení uskutečňuje s uzavřeným oběhem vzduchu, aby se stroj nezanášel prachem, který zkracuje život izolace.

Kroužky a kartáče se obvykle zhotovují jednoduše, neboť při menších otáčkách není jejich konstrukce nijak náročná.

Ložiska jsou obvykle kluzná, neboť mají tišší chod a můžeme je na místě snadněji opravit než ložiska valivá.

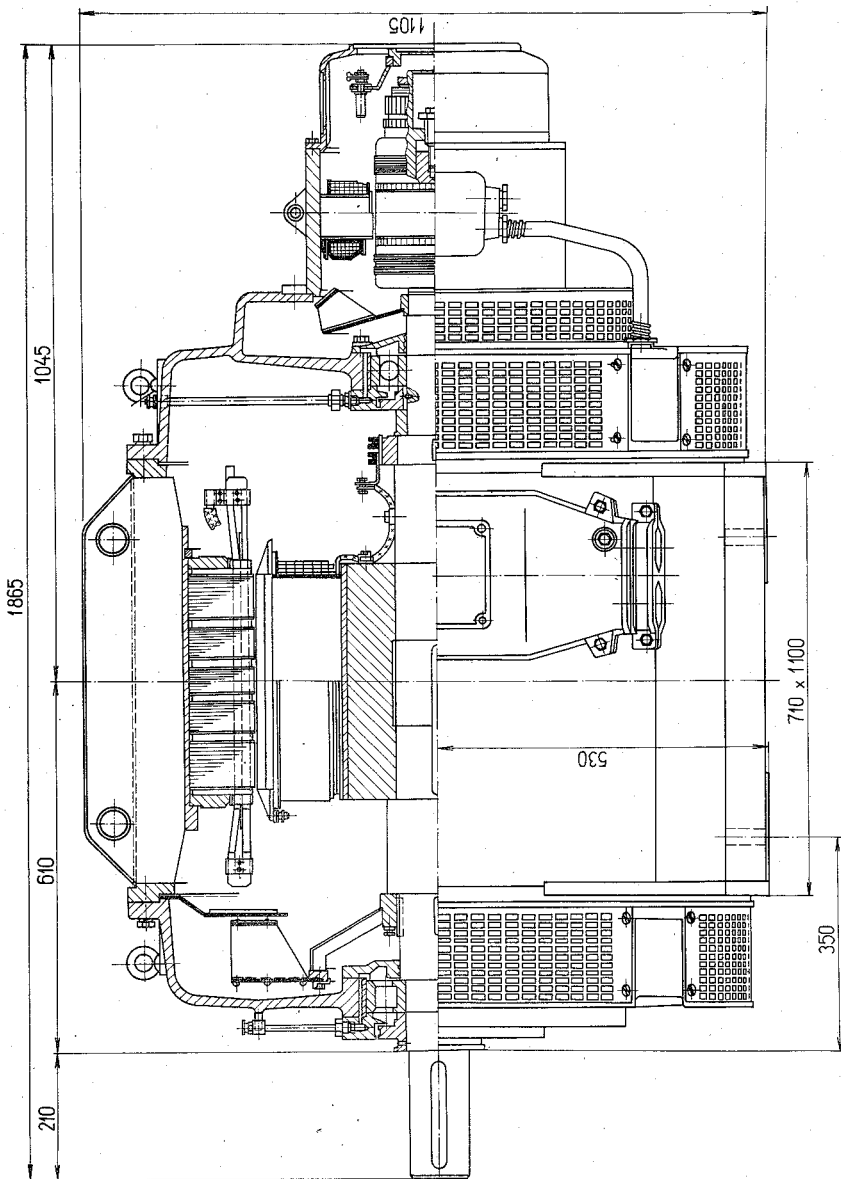
Zvláštní pozornost u všech větších synchronních strojů se musí věnovat hřídelovým (ložiskovým) proudům. Proto musí být vždy jedno ložisko od kostry nebo od základu izolováno, aby se obvod, jímž se mohou proudy uzavírat, přerušil. Stejně musí být izolována všechna potrubí vedoucí k ložisku, např. mazací potrubí.

4.11.2. Příklady konstrukce strojů s vyjádřenými póly

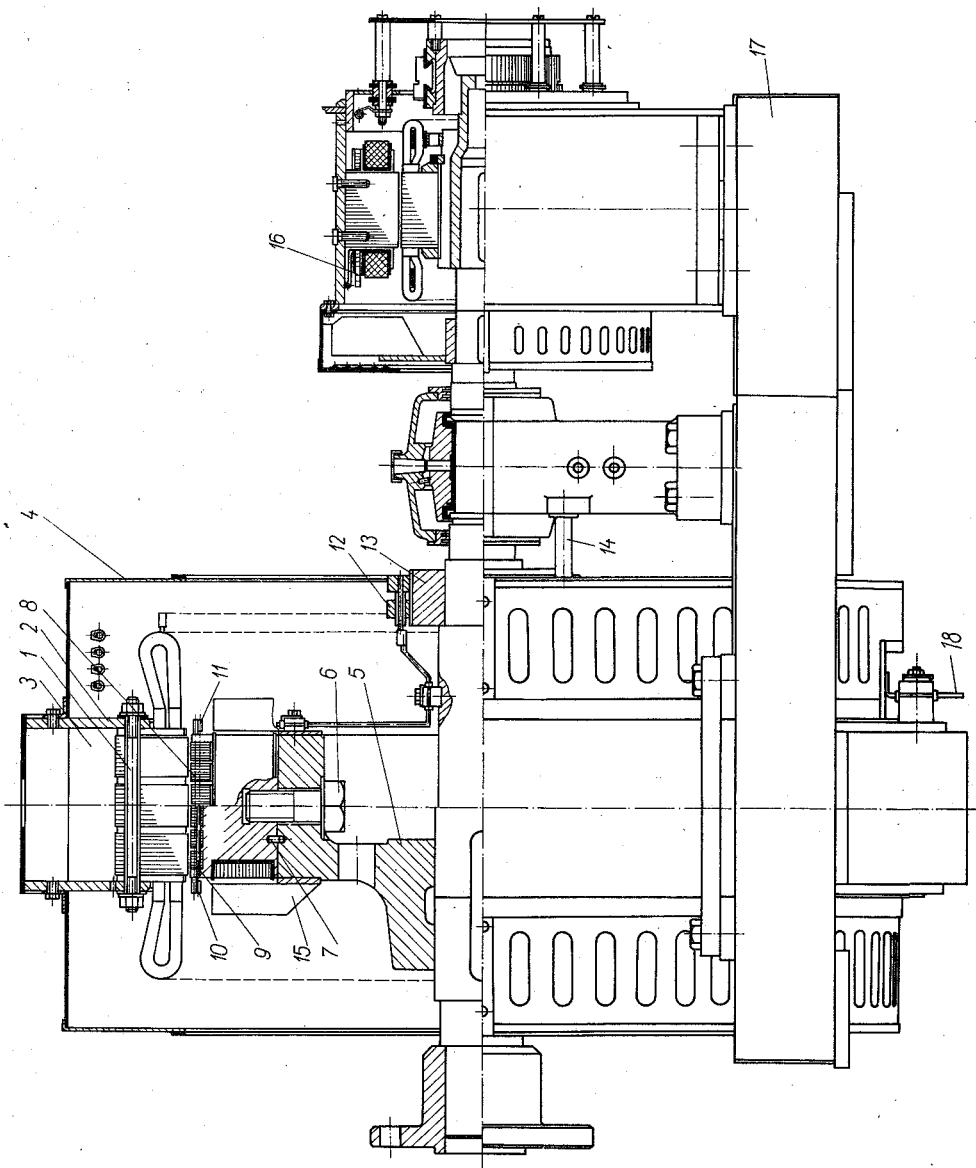
Na obr. 183 je trojfázový alternátor na nízké napětí v klasickém provedení s budičem letmo nasazeným na hřídel.

Na obr. 184 je desetipólový alternátor v setrvačnickovém provedení.

Statorové plechy jsou staženy průběžnými izolovanými svorníky 1 mezi dvě postranice 2 z ocelového plechu. Postranice spolu s navařenými rozpěrnými pásy 3 tvoří hlavní nosnou část statorové kostry.



Obr. 183. Řez trojfázovým alternátorem řady A, 12,5 až 320 kVA, 1500 min⁻¹ (MEZ Frenštát, n. p.)



Čela statorového vinutí jsou po obou stranách chráněna snímatelnými kryty 4. Vinutí je dvouvrstvové, šablonové. Cívky jsou důkladně asfaltovány, vstupní cívky mají zesílenou izolaci proti strmým vlnám.

Rotor je tvořen masivním ocelolitinovým kolem 5, na jehož obvodu je šrouby 6 připevněno 10 ocelolitinových pólů kruhového průřezu. Každý pól je držen jen jediným šroubem a proti pootočení je zajištěn kolíkem 7. Na povrchu masivního pólového nástavce je šest hřebenových zápichů, do nichž jsou vloženy svazky 8 z dynamových plechů. Těmi se dosáhne žádaného tvaru vzduchové mezery. V zápíchách jsou svazky zajištěny nýty 9 a tyčemi tlumičích vinutí 10, jež jsou připojeny po obou stranách ke spojovacím kruhům 11, vytvořeným sešroubováním plochých měděných pásů mezi jednotlivými póly.

Budící cívky jsou z tenkých pásů vinutých navysoko. Přívod proudů k nim obstarávají kroužky 12, nalisované na izolovaném pouzdru 13.

Nosný svorník sběracích kartáčů je zašroubován v tělese ložiskového stojanu.

Lopatky ventilátoru 15 jsou připevněny po obou stranách magnetového kola.

Budič (70 V; 6,2 A) má na pólech kromě normálního derivačního vinutí i kompenzační sériové vinutí 16. Jím se budič s rostoucím zatížením samočinně přibuzuje pro vykompenzování rostoucího odporu budícího vinutí oteplením.

Kostra alternátoru, budiče i ložiskové stojany jsou připevněny k základovému rámu 17, který je zapuštěn v základech stroje.

Statorové vinutí má šest vývodů vyvedených plochými pásy 18 ve spodní části alternátoru. Podle potřeby je lze nahradit přímo napojeným kabelem dlouhým 6 m, na něž se v kabelovém kanále připojí další kabelový rozvod.

4.12. HYDROALTERNÁTORY

4.12.1. Konstrukční požadavky

Hydroalternátory se nazývají alternátory poháněné volnoběžnými Kaplanovými nebo Francisovými vodními turbínami. Jejich charakteristickým znakem je větší počet pólů a jím odpovídající větší průměr. Hydroalternátory rozměrově představují největší elektrické stroje (průměr i nad 10 m, celková stavební výška s příslušenstvím i nad 30 m).

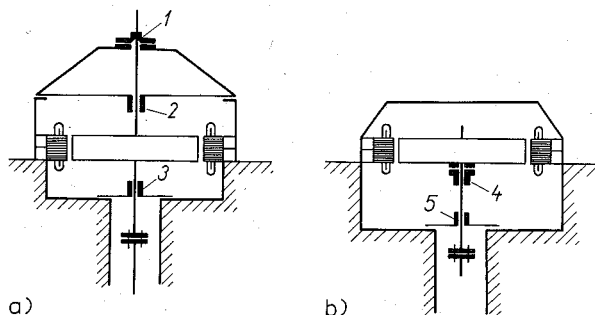
Obr. 184. Trojfázový alternátor řady FK v setrvačnickovém provedení, 260 až 1010 kW, 600 min⁻¹ (BEZ Bratislava, n. p.)

1 – izolovaný stahovací svorník, 2 – statorové postranice, 3 – rozpěrné pásy, 4 – plechový kryt čel vinutí, 5 – magnetové kolo, 6 – připeňovací šrouby, 7 – zajišťovací kolík, 8 – svazky z dynamových plechů v pólových nástavcích, 9 – nýty, 10 – tyč tlumiče, 11 – spojovací kruh tlumiče, 12 – kroužky, 13 – izolační pouzdro, 14 – nosný kolík, 15 – lopatky, 16 – sériové kompaundační vinutí, 17 – základový rám, 18 – vývodové pásy

Potíže při konstrukci představují zejména dva základní problémy:

1. Velké mechanické namáhání rotoru, úměrné jednak velkým průměrům a jednak možnosti proběhnutí turbíny při náhlém odlehčení na velké tzv. *průběžné otáčky*. U Kaplanových turbín mohou být až 3,2krát větší než jmenovité otáčky. Odstředivé síly jsou přitom až desetinásobné.

2. Zvládnutí velkých osových tlaků vznikajících působením tíhy rotoru alternátoru, rotoru turbíny, rotorů hlavního i pomocného budiče a tzv. hydraulickou složkou, která představuje nevyvážený osový tlak vody na oběžné kolo turbíny. Celkové osové síly mají velikost i přes 20 MN a musí je zachytit jediné vertikální ložisko.



Obr. 185. Uspořádání hydroalternátorů

a) normální provedení, b) deštníkové provedení

1 – závěsné ložisko, 2, 3 – vodicí ložiska, 4 – kombinované závěsné a vodicí ložisko,
5 – spodní vodicí ložisko

Nejobvyklejší je *závěsné* provedení hydroalternátoru, u něhož je závěsné ložisko umístěno nad rotorem alternátoru a hřídel je kromě toho veden ještě dvěma vodicími ložisky (obr. 185a). Horní závěsné ložisko bývá obvykle kombinováno s jedním vodicím ložiskem.

Tam, kde je třeba ze stejných důvodů zmenšit celkovou výšku stroje, používá se *deštníkový* typ alternátoru (obr. 185b), u něhož je rotor upevněn letmo na hřídeli vedeném kombinovaným závěsným i vodicím ložiskem umístěným těsně pod rotorem a jedním samostatným vodicím ložiskem, které patří často už samotné turbíně.

Statorová kostra je svařovaná a obvykle musí svojí tuhostí vydržet tíhu všech otáčejících se částí spolu s hydraulickým tlakem. Aby za

provozu byla dodržena stálá vzduchová mezera, musí se všechny svařované části vyžítat, aby sváry neměly vnitřní napětí, které by mohly způsobit deformace.

Statorové vinutí bývá obvykle tyčové se dvěma tyčemi v drážce. Tyče bývají někdy permutované jako u turboalternátorů.

Chlazení je u větších výkonů oběžné. Chladiče bývají rozmístěny obvykle na vnějším obvodu stroje. Jen stroje menších výkonů vyfukují chladičí vzduch přímo do prostoru strojovny.

Hydroalternátory mezních výkonů mají vodní chlazení. Proudem vody se chladí

1. statorové vinutí – plochými trubkami, vloženými do statorových drážek mezi závity vinutí,
2. statorový svazek,
3. stahovací desky rotorového svazku,
4. budicí vinutí – dutinami v plochých vodičích pólových cívek,
5. je možné chladit i těleso pólu a pólového nástavce kovovým rámem, kterým prochází proud a je vložen mezi pól a budicí cívkou.

Nosné (závěsné) ložisko je po rotoru nejnamáhanější částí hydroalternátorů. Jeho konstrukce vychází z podmínky, aby se při všech provozních stavech vytvořil a udržel olejový film, potřebný k dosažení výhodného kapalinového tření. Na tomto principu je sestrojeno tzv. *segmentové ložisko*.

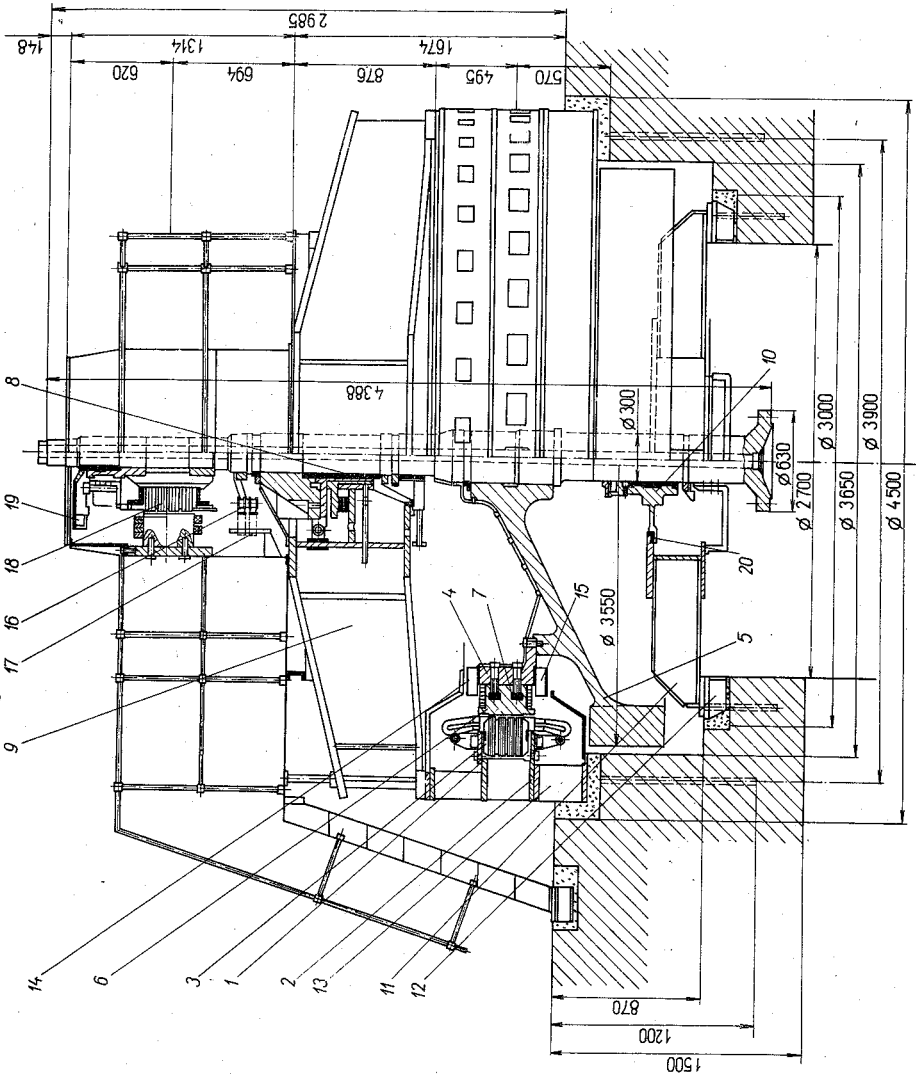
Závěsné ložisko alternátorů je uloženo v horní nosní hvězdě, kterou se jeho zatížení přenáší na těleso statorové kostry. Nosná hvězda musí být velmi tuhá, protože se zřetelem ke konstrukci turbíny se smí i při těch největších zatíženích prohnout nejvýše o 0,5 až 0,8 mm.

4.12.2. Příklad konstrukce hydroalternátoru

Na obr. 186 je hydroalternátor „menšího“ výkonu na 1150 kVA, 6300 V, 150/437 min⁻¹, 50 Hz, o celkové hmotnosti 41 773 kg.

Kombinované závěsné a vodící ložisko 8 je uloženo v horní nosné traverze 9, které spočívá na tělese kostry. Spodní vodící ložisko 10 je izolačně uloženo ve spodní traverze 11, umístěné na zvláštním základu v turbínové šachtě pomocí patek 12.

K chlazení slouží dva radiální ventilátory 14 a 15, připevněné na obou stranách magnetového věnce. Nasávají vzduch z prostoru nad strojem



a nad turbínou a vyfukují ho otvory ve statorové kostře přímo do prostoru strojovny.

Nad závěsným ložiskem jsou na společném náboji dva sběrací kroužky 16. Sběrací ústrojí je upevněno na zvláštní konzole uvnitř plechového krytu. Budič 18 je chlazen samostatným ventilátorem 19. Spojení s turbínou je provedeno přírubou, vykovanou přímo na konci hřídele.

4.13. TURBOALTERNÁTORY

4.13.1. Konstrukční požadavky

Turboalternátory jsou po konstrukční a výrobní stránce nejnáročnější elektrické stroje. Při své celkové dispozici – omezený průměr, velká osová délka – kladou velké nároky na účinné chlazení a se zřetelem k velkým otáčkám ($3000, 1500 \text{ min}^{-1}$) představují stroj pracující téměř na hranici mechanické pevnosti.

Stator je obvykle složen z dynamových plechů tloušťky 0,5 mm. Jen krajní plechy mají větší tloušťku. Protože jde o průměry kolem 1000 mm, musí se statorový svazek skládat ze segmentů, upevněných na klínových lištách. Velmi důležité je, aby se plechy na hranách nespojovaly, zejména ne v prostorách drážek. Protože jsou po jedné straně pospojovány upevňovacími lištami, vznikne při náhodném spojení i na jiném místě vodivý závit spojený nakrátko a velkým magnetickým tokem se v něm indukují tak velké proudy, že železo v místě spojení úplně prohoří.

Pro zmenšení ztrát v železe se začínají i u alternátorů zavádět orientované plechy. Protože asi 4/5 ztrát v železe vznikají ve jhu, skládají se orientované plechy tak, aby směr válcování souhlasil se směrem indukčních čar ve jhu. Ztráty v zubech jsou potom o něco větší.

Obr. 186. Trojfázový alternátor 1150 kVA, 6300 V, 106 A, $150/437 \text{ min}^{-1}$

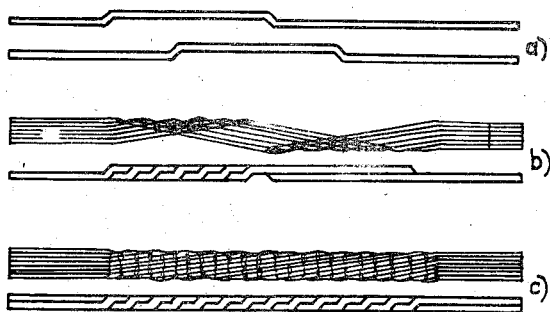
(ČKD Praha, o. p.)

1 – stator, 2 – spodní postranice, 3 – horní postranice, 4 – magnetové kolo, 5 – setrvačník, 6 – póly, 7 – lišty, 8 – závěsné ložisko, 9 – horní nosná traverza, 10 – spodní vodicí ložisko, 11 – spodní traverza, 12 – upevňovací patka, 13 – základový kruh, 14, 15 – ventilátory, 16 – kroužky, 17 – sběrací ústrojí, 18 – budič, 19 – ventilátor budiče, 20 – izolace spodního ložiska

Statorový svazek se stahuje masívními nemagnetickými deskami. Ty jsou u strojů mezních výkonů lepeny z plechů, čímž se příznivě ovlivní rozptylový tok v čelních prostorech.

Statorová kostra je svařovaná.

Statorové vinutí má obvykle v drážce jen dvě masívní tyče, které jsou pro zmenšení přídavných ztrát složeny z většího počtu paralelních pramenů. Ty jsou konstruovány tak, že v průběhu drážky vystřídají všechny možné polohy, a mají tak všechny stejnou reaktanci.



Obr. 187. Postup vytvoření Roebelovy permutované tyče

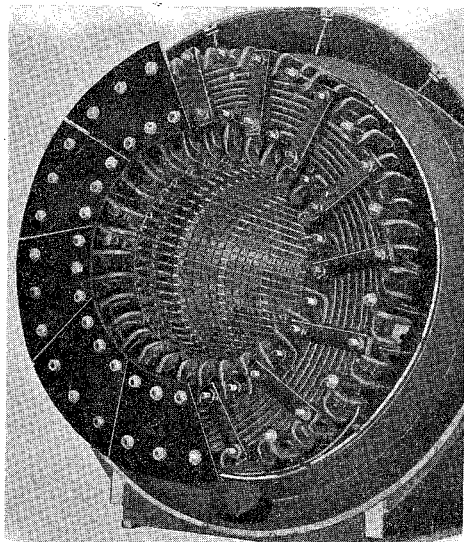
Nejčastější je permutovaná *Roebelova tyč*. Princip této tyče se za posledních 60 let vůbec nezměnil. Postup vytvoření Roebelovy tyče je na obr. 187. Jednotlivé prameny tyče jsou vyhnuty podle obr. 187a tak, že místo ohybu jednotlivých pramenů je posunuto vždy o šířku vodiče. Polovina tyčí jedné cívkové strany se složí na sebe podle obr. 187b. Druhá polovina pramenů s ohyby na druhou stranu se složí stejně a obě poloviny se do sebe zaklesnou svými ohyby tak, že vznikne jedna tyč, jejíž prameny postupně přejdou všemi polohami v drážce (obr. 187c).

Roebelova tyč alternátoru BBC o výkonu 1333 MVA je dlouhá až 11 m.

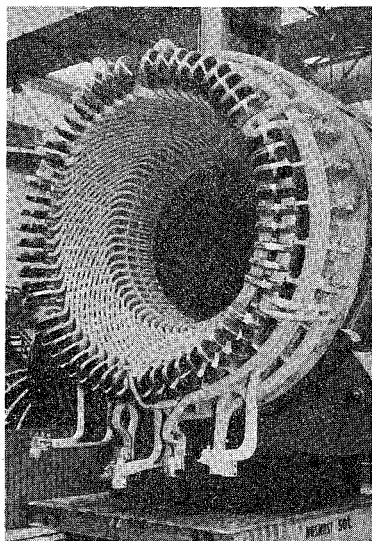
Prameny Roebelovy tyče se střídají jen v rovné části cívkových stran. Cívkové strany se vkládají do otevřených statorových drážek, které se často pro úmyslné zvětšení rozptylu a tím pro zmenšení proudu nakrátko dělají hluboké. Mezi klínem a vzduchovou mezerou tak vznikne kanál, který přispívá k lepšímu chlazení. Některé zahraniční firmy dělají ventilační kanály i pod dnem drážky.

Provedení čel statorového vinutí může být dvojí.

1. *Evolventní* – do drážky se vloží jen rovné části cívkových stran, k nimž se stříbrnou pájkou připájí plné čelní spojky z plochého měděného pásu. Čela tvoří evolventy umístěné na dvou rovnoběžných rovinách a jsou všude stejně od sebe vzdálena. Tvar čel a jejich vyztužení je zřejmé z obr. 188a. Tato úprava čel dává sice krátkou osovou délku, ale je nevýhodná tím, že čela jsou blízko železa, takže se kolem nich vytváří silné rozptylové magnetické pole, které zvětšuje přídavné ztráty ve stahovacích deskách.



a)



b)

Obr. 188.

a) evolventní čela vinutí turboalternátoru, b) košové uspořádání čel turboalternátoru 235 MVA, vinutí s přímým vodním chlazením (Škoda o. p., Plzeň)

2. Zmenšení přídavných ztrát asi o 30 % umožňuje *košové vinutí*, jehož čela jsou umístěna na dvou kuželových plochách odkloněných od stroje asi o 12 až 20°. Cívky jsou vytvořeny ze dvou zformovaných půlcívek, permutovaných jen v rovné drážkové části. V čelech jdou jednotlivé prameny paralelně. Půlcívky se v čelním oku spájejí, a tak se místo ohybu s největším rozptylovým tokem dostává co nejvíce od železa.

Nevýhodou je větší osová délka. Příklad konstrukce a vyztužení je na obr. 186b. Pro vyztužení se používá dvou až tří kruhů z nemagnetické oceli.

Napětí statorového vinutí bývá dnes nejvýše 24 až 26 kV, za horní hranici se považuje 30 kV.

Rotor jako nejnamáhanější část je vykován obvykle vcelku z jakostní chromniklové oceli. Pro zvlášť namáhané rotory se volí v posledním období niklchrommolybdenová ocel. S ohledem na odstředivé síly bývá průměr rotoru kolem 1000 mm, u strojů mezních výkonů 1250 až 1330 mm.

Tvar rotorové drážky je závislý na způsobu chlazení. V širokém zubu v ose pólu, kde už není uloženo budicí vinutí, jsou zářezy, jimiž se vyrovnávají kritické otáčky v obou osách. U moderních strojů jsou kritické otáčky pod jmenovitými otáčkami a bývají 1200 až 1600 min⁻¹. Zářezy jsou zavřeny ocelovými klíny, provrtanými jen ve střední části stroje; takže se jimi dostává chladnější vzduch až do nejméně chlazených částí.

Rotorové budicí vinutí se dělá z pásů tvrdé mědi, válcované zastudena a legované 0,1 % stříbra. Materiál vinutí je značně namáhan zejména deformacemi při teplotních cyklech, Cívky se musí navíjet z úplně rovných pásů a musí důkladně dosedat na dno drážek, aby se vyloučil jejich jakýkoli pohyb.

Drážky s vinutím se uzavřou lichoběžníkovými kovanými bronzovými, popř. i mosaznými nebo duraluminiovými klíny, které se do drážky zalícují, aby byl zaručen dokonalý styk s tělesem rotoru. Pod klíny a na dno se vkládají proužky sklogumoidu, který umožní klouzání při změnách teploty. Klíny jsou na konci kladivovitě rozšířeny, takže vytvoří zvětšenou plochu, na níž dosedne bandážovací kruh. *Bandážovací obruče* spolu s klíny vytvoří uzavřenou klec amortizéru. Jsou z jakostní oceli a jsou za provozu silně namáhány. Namáhání zvětšují ventilační otvory, které se do nich navrtají pro lepší chlazení rotorových čel.

I když průměr bandážovacích obručí je větší než průměr rotoru, může se provléknout vrtáním statoru, neboť vzduchová mezera bývá velká, asi 15 až 50 mm, u strojů mezních výkonů 100 až 150 mm.

Kroužky jsou ocelové, masívní, pro lepší chlazení povrchu mají na obvodu spirálovité zápichy. Obvykle bývají osazeny po jednom na každé straně stroje.

4.13.2. Vzduchové chlazení

Systémem chlazení byly omezeny maximální dosažitelné výkony při použití vzduchu jako chladicího média.

První turboalternátory měly chlazení *komorové* nebo *kapsové*.

Chlazení turboalternátorů je v každém případě cirkulační. Z podtlakového prostoru vstupuje vzduch do vodních chladičů umístěných v šachtě pod strojem a z nich se ventilátory stroje opět nasává. Chladič bývá složen z několika dílů, takže revize a jeho čištění lze provádět i za provozu vyřazením některé jeho části. V okruhu chlazení bývá umístěno samočinné hasicí zařízení. Hasicím prostředkem bývá CO_2 , odebíraný z trvale připravených lahví. V případě požáru začne na popud teploměru stříkat do stroje v podobě jemné mlhy.

Teplota různých míst statorového svazku a statorového vinutí se trvale dálkově kontroluje odporovými teploměry. Vývody měřicích sond jsou vyvedeny na samostatnou svorkovnici.

Příklad konstrukce vzduchem chlazeného alternátoru s hlavním pomocným budičem je na obr. 189.

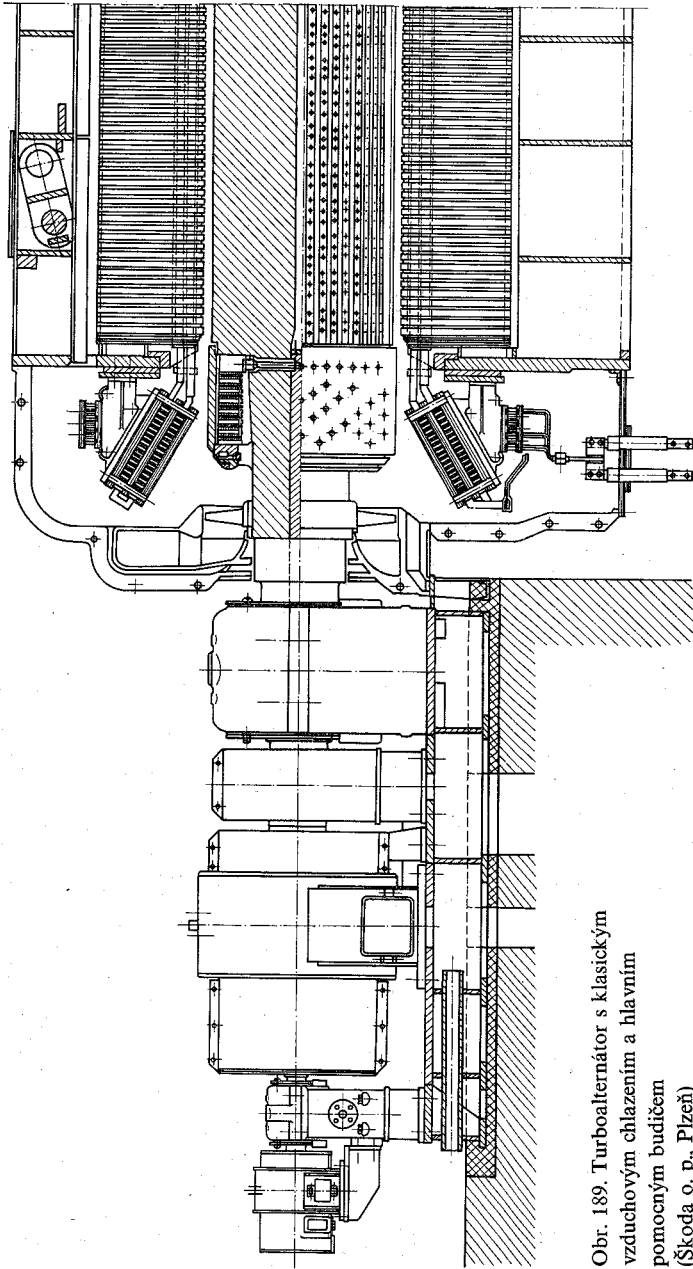
4.13.3. Vodíkové chlazení

Vodíkové chlazení je dnes běžné pro všechny stroje s výkonem nad 50 MVA. U vodíkového chlazení nahrazuje vodík vzduch. Jeho výhodou jsou menší ventilační ztráty a ztráty třením o chladivo, neboť jeho měrná hmotnost je 14,4krát menší než měrná hmotnost vzduchu, takže k odvedení stejných ztrát stačí jen 1/4 výkonu potřebného pro vzduchové chlazení. Vodík má při tlaku 400 kPa chladicí schopnost až čtyřikrát větší než vzduch. Menší potřebě vodíku odpovídají i menší chladiče.

Zmenšení ztrát dovoluje zvětšit zatížení železa i mědi a celkové zvětšení výkonu turboalternátoru při stejných rozměrech asi o 25%. Účinnost u vodíkového chlazení vyjde o 0,75 až 1% lepší. Zisk ze zlepšené účinnosti představuje při výkonu 100 MVA úsporu 1 MVA. Už tato skutečnost vyváží složitější konstrukci a potřebu pomocného zařízení.

Výhodou vodíkového chlazení je i to, že izolace ve vodíkové atmosféře vlastně nestárne. Ve vzduchu se její život zkracuje přítomností O_2 , N_2 , vodních par a ozónu, který vzniká ionizací vzduchu.

Protože vodík při 20% znečištění vzduchem vytváří velmi výbušnou směs, nesmí se vzduch do něho za žádných okolností dostat. Vnitřek se

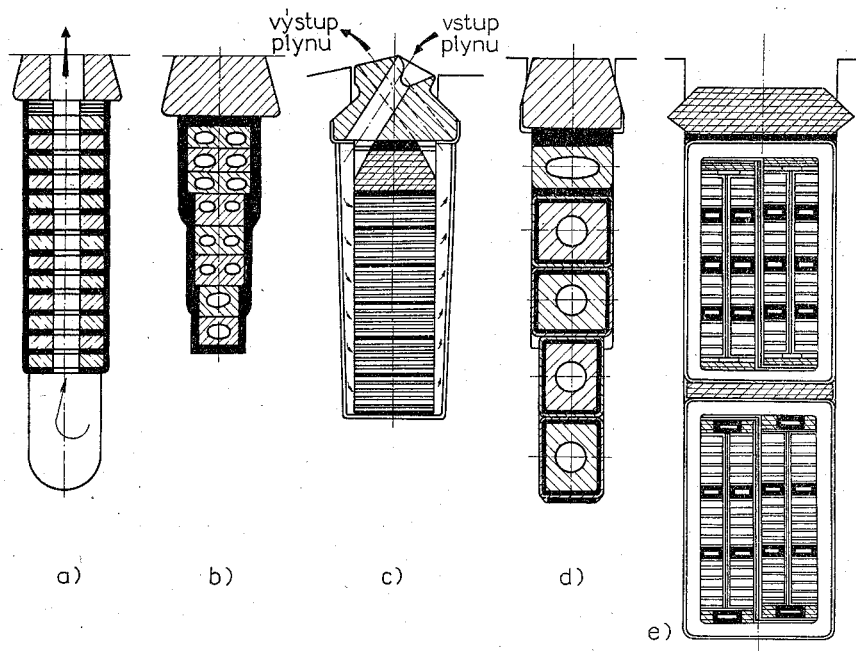


Obr. 189. Turboalternátor s klasickým
 vzduchovým chlazením a hlavním
 pomocným buďičem
 (Škoda o. p., Plzeň)

proti okolnímu prostředí utěsňuje vhodným přetlakem vodíku. Původně býval asi 3 kPa. Obtíže způsobují hřídelové ucpávky, které musí být konstruovány speciálně pro tyto případy. Dnes se při jednoduchém nepřímém chlazení používá tlak až do 200 kPa.

Kostra stroje musí být provedena tak, aby vydržela tlak asi 700 kPa. Pro zvětšení pevnosti má vypouklé štíty.

Při původním nepřímém chlazení bylo proudové využití vodičů omezeno poměrně tlustou vrstvou drážkové a mezizávitové izolace, úměrné velikosti použitého napětí, která velmi zhoršovala přestup tepla do chladicího plynu. V roce 1950 nastal podstatný obrat v konstrukci turboalternátorů zavedením přímého (vnitřního) vodíkového chlazení. V tomto případě se vodík zavádí přímo do vnitřku vodičů nebo do jejich těsné blízkosti.



Obr. 190. Konstrukce drážek turboalternátorů

a) rotorová drážka s axiálním vodíkovým chlazením, b) rotorová drážka s dutými vodiči – vodíkové chlazení, c) rotorová drážka nabíracího vodíkového chlazení, d) rotorová drážka s přímým vodním chlazením, e) statorová drážka s přímým vodním chlazením

Statorové vinutí má buď duté vodiče, nebo několik vrstev vodičů oddělených od sebe tence izolovanými kovovými trubkami, jimiž proudí chladičí vodík.

Pro chlazení rotorového vinutí jsou možné tři soustavy.

1. Soustava s poddrážkovým kanálem a radiálními otvory ve vodičích, jimiž vodík vystupuje ven (obr. 190a).

2. Axiální soustava, u níž vodík prochází přímo dutinami v masivních rotorových vodičích (obr. 190b). Ven se dostává uprostřed stroje radiálními otvory ve vodičích a klínech.

3. Naběrací soustava (Punga, obr. 190c). Nabírání plynu ze vzduchové mezery umožňují zvláštní výstupky na rotorových drážkových klínech, jež jsou opatřeny vhodně směřovanými otvory, vyústujícími v rozváděcím kanále mezi drážkovou izolací a rotorovou cívkou. Plyn se nabírá na návětrné straně mírným nárazovým tlakem vstupního otvoru, vstupuje do rozváděcího kanálu v drážce a přes vinutí přestupuje soustavou příčných kanálů na druhou stranu drážky, odkud se dostává do výstupního otvoru v klínu. K proudění přispívá i sací účinek výstupních otvorů na závětrné straně.

Při přímém chlazení musí mít vodík vyšší tlak, aby mohl proudit všemi úzkými kanály ve stroji. Bývá i přes 400 kPa.

4.13.4. Chlazení kapalinou

V poslední době se vývoj stavby velkých turboalternátorů zaměřuje na chlazení kapalinou. V počátcích se používal olej, dnes výhradně chemicky čistá voda. Voda má chladičí schopnost až 50krát větší než vzduch a asi 12krát větší než vodík. Nejdříve se začala používat jen k přímému chlazení statorového vinutí. Statorová Roebelova tyč má v sobě určitý počet dutých vodičů tvořících součást závitu. Jeden dutý vodič připadá asi na osm plných vodičů. Stroje s výkony kolem 1000 MW mají místo dutých měděných vodičů ploché čtyřhranné tenkostěnné trubky z nemagnetické a nerezavějící oceli (obr. 190e). Přívod vody do chladicích trubek obstarávají různě řešené připojovací koncovky.

Aby bylo vinutí dobře izolováno od vnějšího vodního rozvodu a chladičů, připojuje se voda k vinutí např. teflonovými hadicemi, v nichž se vytvoří potřebný izolační sloupec čisté vody. Vodivost vody se udržuje na hodnotě menší než $50 \mu\text{S m}^{-1}$.

Pokud se voda používá jen k chlazení statorového vinutí, je rotor chlazen vodíkem, který podle charakteru konstrukce chladí i jiné části stroje.

Asi od roku 1966 se používá voda i pro chlazení rotoru. Rotorové vinutí je konstruováno podle obr. 190d. Chladicí voda protéká současně i horní dutou tyčí tlumicího vinutí. Voda se do rotoru přivádí dvěma soustřednými trubkami z nemagnetické a nerezavějící oceli přes dvě vodní komory na konci rotoru, odkud je k vinutí vedena vysokotlakými izolačními hadicemi.

Zavedením úplného vodního chlazení se změnila podstatně celková koncepce turboalternátorů. Není zapotřebí tlakovzdorná venkovní kostra a složité hřídelové ucpávky a štítová ložiska jsou nahrazena výhodnějšími stojanovými ložisky.

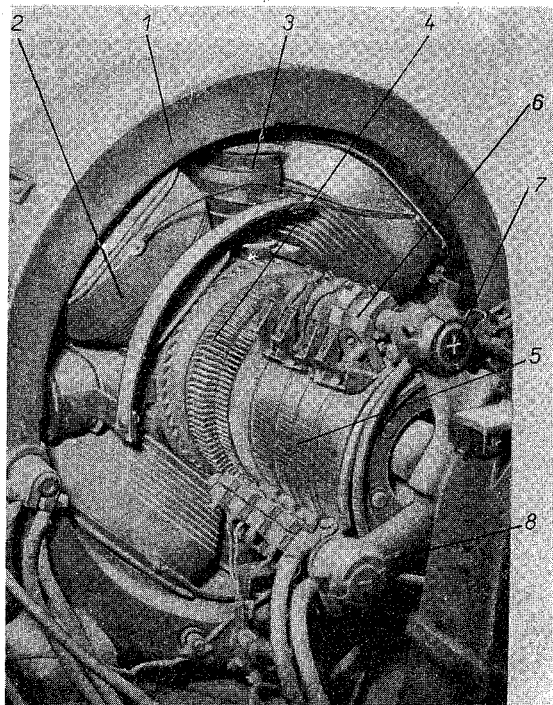
5. STEJNOSMĚRNÉ STROJE

5.1. ZÁKLADNÍ POJMY

5.1.1. Popis stejnosměrného stroje

Hlavní části stejnosměrného stroje jsou vyznačeny na obr. 191, na němž je snímek přehledně uspořádaného stroje dnes už nepoužívané otevřené konstrukce.¹

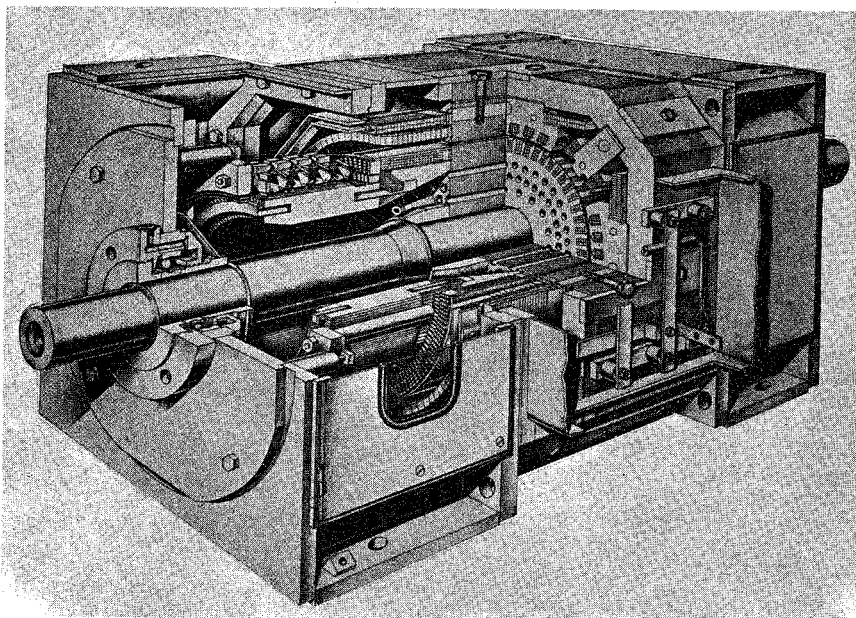
Masivní litá nebo svařovaná kostra 1 tvoří magnetový věnec, kterým se jako jhem uzavírá magnetický tok. Věnec nese budicí vinutí, které se



Obr. 191. Uspořádání stejnosměrného stroje
1 – statorová kostra,
2 – hlavní pól s budícím vinutím, 3 – pomocný pól,
4 – kotva, 5 – komutátor,
6 – kartáče, 7 – nosný svorník, 8 – nosný kruh

skládá z pólových jader, ukončených pólovými nástavci a opatřenými budícím vinutím 2.

Cívky magnetů jsou napájeny stejnosměrným proudem, obvykle z vlastních svorek stejnosměrného stroje, a budí magnetický tok. Tvar magnetického pole ve vzduchové mezeře stroje je upraven tvarem pólových nástavců. Cívky jsou zapojeny tak, že střídavě budí severní a jižní pól.



Obr. 192. Řez moderním stejnosměrným strojem s lištěným statorem

Mezi hlavními póly jsou umístěny úzké pomocné, tzv. komutační póly 3, jejichž úlohou je zlepšovat provozní vlastnosti stroje. Rotor 4 je složen z plechů a v jeho drážkách je uloženo stejnosměrné vinutí. Začátky a konce cívek jsou připojeny na měděné lamely komutátoru 5, na něž dosedají uhlíkové kartáče, uložené v držácích kartáčů 6. Držáky jsou nasazeny na sběracích svornících 7, jež jsou upevněny v nosném kruhu 8. Ten umožňuje natočení kartáčů do nejvhodnější polohy.

Řez stejnosměrným strojem moderní konstrukce je na obr. 192.

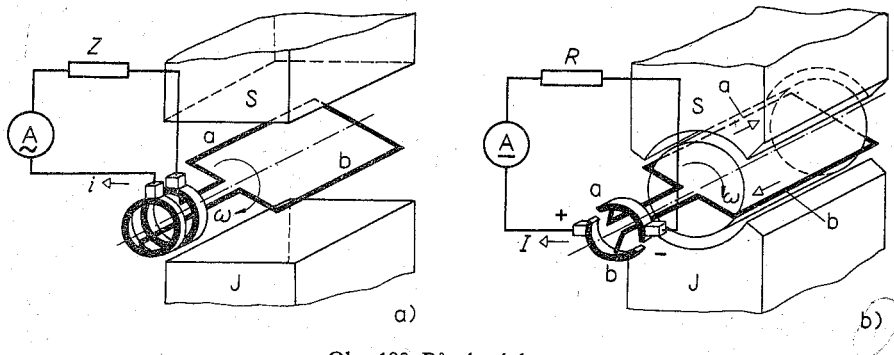
5.1.2. Princip činnosti

Nejjednodušší generátor elektrického proudu je na obr. 193.

V homogenním magnetickém poli mezi dvěma póly se otáčí závit, jehož začátek a konec jsou připojeny na dva kroužky, které se spolu s ním otáčejí. Magnetický tok, spřažený s otáčejícím se závitem, se mění s časem podle sinusovky a v závitě se indukuje střídavé napětí. Polarita obou kroužků se periodicky mění podle toho, zda vodič spojený s kroužkem je pod severním nebo jižním pólem. I proud, který prochází uzavřeným vnějším obvodem, je střídavý.

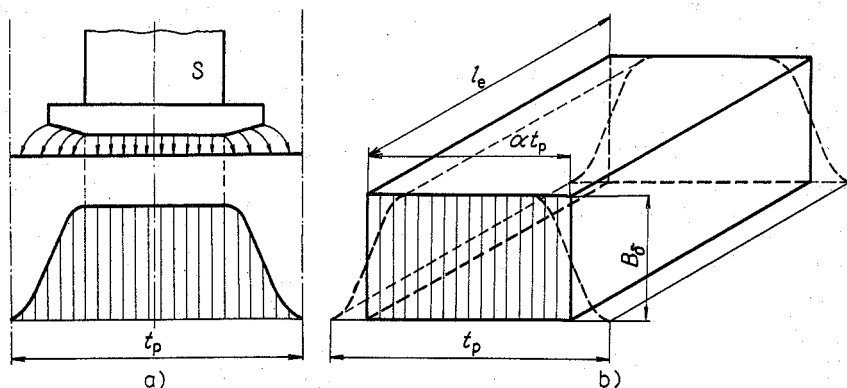
Stroj podle obr. 193 má velmi velkou vzduchovou mezeru, při níž je třeba k vybuzení potřebného magnetického toku velké magnetomotorické napětí. Proto všechny točivé elektrické stroje mají vodiče uloženy v drážkách válcového rotorového svazku, složeného z dynamových plechů, a póly s vhodně tvarovanými pólovými nastavci, takže vznikne jen malá vzduchová mezera, vyžadující jen malé buzení. Při této úpravě vstupují indukční čáry na povrch železa kolmo, takže rotorové vodiče se pohybují vždy kolmo k jejich směru a při stálé rychlosti je okamžitá hodnota indukovaného napětí úměrná indukci magnetického pole ve vzduchové mezeře. Časový průběh indukovaného napětí můžeme velmi jednoduše ovlivnit tvarem pólových nastavců, které určují velikost vzduchové mezery a tím i velikost magnetické indukce.

Jde-li o generátor stejnosměrného proudu, musí výsledné napětí měnit co nejméně svou velikost. Proto mají stejnosměrné stroje pólové nastavce tvarovány tak, že vzduchová mezera je konstantní na co

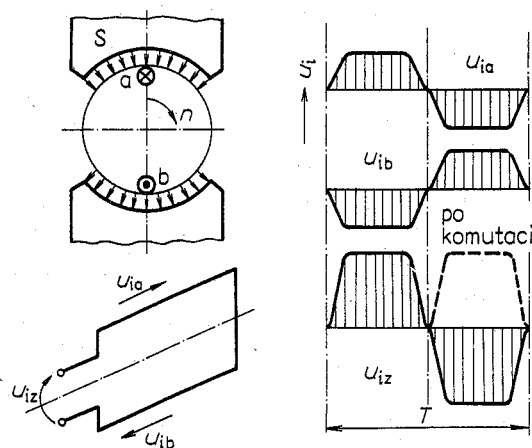


Obr. 193. Působení dynamo

a) střídavý generátor se sběracími kroužky, b) dynamo s komutátorem



Obr. 194. Magnetické pole stejnosměrného stroje
 a) průběh magnetomotorického napětí pod jedním pólem, b) magnetický tok jednoho pólu



Obr. 195. Průběh napětí indukovaného v jednom závitě

největší části pólové rozteče (obr. 194). Jen okraje pólů jsou zkoseny, abychom dosáhli plynulého přechodu magnetické indukce i indukovaného napětí z jedné polaroty do druhé.

Na obr. 195 je opět vyznačen závit otáčející se v magnetickém poli. V každém jeho vodiči (a – b) se indukuje napětí opačné polarity u_{ia} , u_{ib} . Protože jsou oba vodiče spojeny do série, je výsledné indukované napětí jednoho závitu u_{iz} dáno aritmetickým součtem obou napětí $u_{ia} + u_{ib}$. Je to ještě stále střídavé napětí, i když už nemá sinusový průběh.

Usměrnění tohoto střídavého napětí, indukovaného v otáčejícím se závitě, zajišťuje komutátor.

5.2. PŮSOBENÍ KOMUTÁTORU

5.2.1. Působení komutátoru u dynama

Na obr. 193b je vyznačen princip stejnosměrného generátoru – dynama. Začátek a konec závitu otáčejícího se v magnetickém poli jsou připojeny ke dvěma měděným lamelám, izolovaně umístěným na válcové ploše a otáčejícím se spolu se závitem. Polarita lamel se mění stejně jako se mění polarita kroužků na obr. 193a. Po lamelách kloužou dva uhlíkové kartáče, které jsou pevné a neotáčejí se. Střídavě se dotýkají jedné a druhé lamely. Jejich poloha je taková, že jeden kartáč se dotýká jedné lamely tak dlouho, dokud je např. kladná a druhý se podobně dotýká stejně dlouhou záporné lamely.

Komutátor (soustava lamel a kartáčů) u dynama usměrňuje střídavé napětí indukované v otáčejících se cívkách.

Komutace se nazývá časová změna proudu v tom závitu (nebo v cívce), který je právě v neutrální poloze a kartáče ho na krátký čas spojují nakrátko. Kartáče musí být proto umístěny tak, aby nakrátko spojovaly lamely těch cívek, které právě komutují.

Usměrněné napětí (nebo příslušný usměrněný proud) jednoho závitu značně pulsuje. Jeho polarita je sice stálá, ale velikost se mění od nuly do maximální hodnoty.

Hladšího průběhu se dosáhne použitím několika stejných cívek, stejnoměrně rozložených po obvodu rotoru (kotvy) a vhodně pospojovaných podle druhu použitého vinutí. Komutátor má potom tolik lamel, kolik je cívek. Způsob připojování cívek na komutátor závisí také na druhu vinutí.

5.2.2. Působení komutátoru u motoru

Ke svorkám motoru přivádíme stejnosměrný proud, který prochází vodiči kotvy. Protože se tyto vodiče nacházejí v magnetickém poli, působí na ně jistá síla a motor se otáčí. Směr otáčení lze určit např. pravidlem levé ruky. Kdyby však vodiči procházel trvale stejnosměrný proud, přestaly by se vodiče pohybovat po dosažení neutrální polohy – v ose mezi dvěma sousedními póly. Aby se kotva mohla otáčet dále původním směrem, musí se smysl proudu v nich po přechodu od jednoho pólu ke druhému

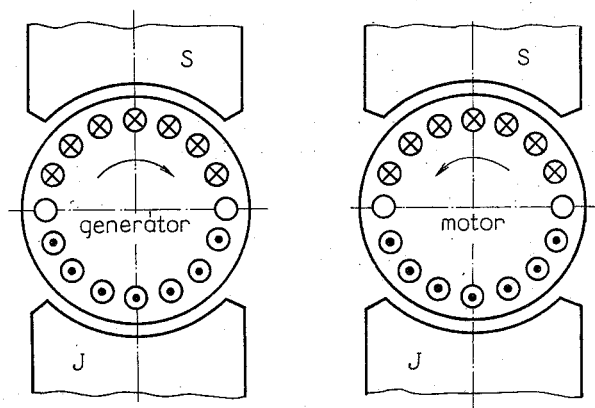
změnit. Tuto změnu smyslu proudu ve vodičích rotorového vinutí obstarává komutátor.

Komutátor u stejnosměrného motoru mění smysl proudu ve vodičích rotoru tak, že se rotor otáčí trvale jedním směrem.

Tažná síla motoru pulsuje podobně jako pulsuje indukované napětí dynama. Čím více cívek má motor, tím je tah plynulejší. Zmenšuje se tím, že se některé cívky během komutace spojují kartáči nakrátko a nepřispívají k vytváření točivého momentu.

Poznámka. Další úvahy o stejnosměrných strojích platí společně pro motor i generátor. Je třeba respektovat pravidlo:

Při stejné polaritě pólů a při stejném smyslu proudu v kotvě je směr otáčení motoru a generátoru opačný, jak to plyne z obr. 196, neboť při stejné polaritě pólů a při stejném směru otáčení je směr proudu v kotvě motoru a dynama opačný.



Obr. 196. Směr otáčení dynama a motoru

5.3. STEJNOSMĚRNÁ VINUTÍ

5.3.1. Rozdělení

Stejnospměrná vinutí můžeme dělit podle několika hledisek.

Podle zapojení

- a) *otevřené* – dnes se vůbec nepoužívá, jen ojediněle u hraček,
- b) *zavřené* – dnes se používá výhradně, je navinuto jakoby z jednoho vodiče tak, že i při nadzvihnutí kartáčů zůstane uzavřené.

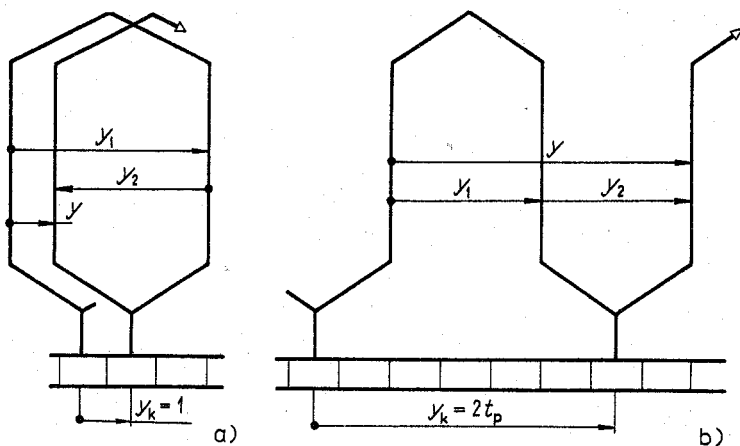
Podle uložení v drážkách

a) *jednovrstvové*,

b) *dvouvrstvové*.

Skoro všechny stejnosměrné stroje mají dvouvrstvové vinutí.

Jen velmi malé univerzální motory se stejnosměrným vinutím mají cívky ručně navinuty přímo na stroji tak, že jedna cívka má obě strany v spodní a další cívka obě strany v horní poloze.



Obr. 197. Základní druhy stejnosměrných vinutí

a) smýčkové vinutí, b) vlnové vinutí

Podle připojení cívek ke komutátoru

a) *smýčkové* – zhotovené podle obr. 197a tak, že začátek a konec cívky (nebo jen závitů) jsou připojeny na dvě sousední lamely komutátoru, takže cívky vytvářejí smyčky,

b) *vlnové* – začátek a konec cívky jsou připojeny na dvě lamely vzdálené od sebe přibližně o dvě pólové rozteče (obr. 197b).

Z těchto dvou základních druhů můžeme odvodit vinutí

a) sériově paralelní,

b) několikanásobně paralelní.

Cívky všech druhů vinutí mají tak jako u střídavých vinutí krok rovnající se přibližně pólové rozteči, aby se v nich indukovalo maximální možné napětí.

Podle počtu závitů v cívce

a) *závitové* – s několika závity v jedné cívce,

b) *tyčové* – s jedním závitem v cívce.

Ve schématech se vinutí vždy kreslí jen s jediným závitem v cívce, aby bylo přehlednější.

5.3.2. Základní pojmy a vztahy

Při výkladu stejnosměrných vinutí používáme tyto symboly a názvy

$2p$ počet pólů

$2a$ počet paralelních větví

N počet všech aktivních závitů v kotvě

$2N = V$ 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 určité 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 zapojených 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

U dvouvrstvého vinutí se dvěma cívkovými stranami v drážce ($u = 1$) je podobně jako u střídavých vinutí

$$n_c = Q \quad (338)$$

a počet lamel komutátoru

$$K = n_c = Q \quad (339)$$

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

$$n_c = uQ \quad (340)$$

a počet lamel komutátoru

$$K = n_c = uQ \quad (341)$$

Celkový cívkový krok je podle obr. 197 dán součtem

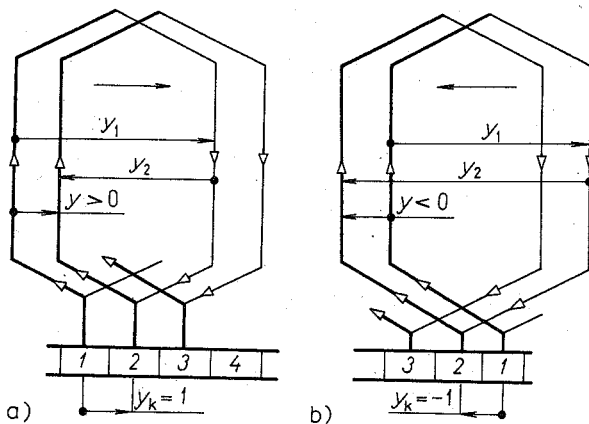
$$y = y_1 + y_2 \quad (342)$$

5.3.3. Smyčkové (paralelní) vinutí

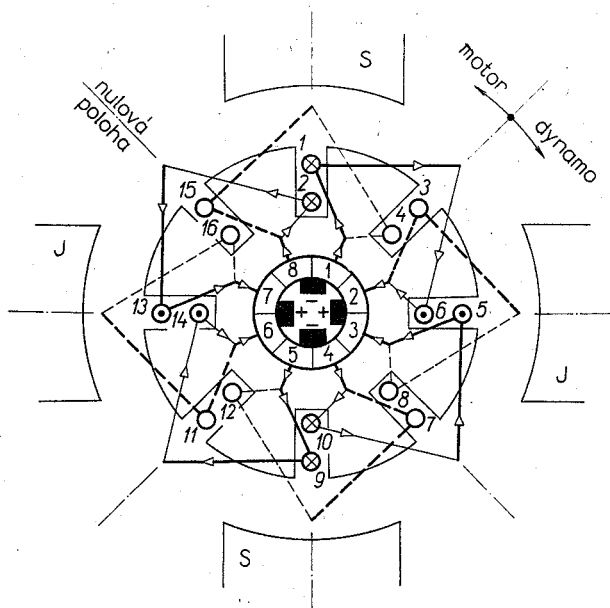
Cívky mají tvar smyček, které můžeme jednu za druhou připojovat ke komutátoru doprava nebo doleva (obr. 198).

Podle toho může být vinutí

a) *nekrřížené* – postupuje směrem doprava, komutátorový krok $y_k = 1$; $y_2 < y_1$ (číselně),



Obr. 198. Smyčkové vinutí nekrřížené a křížené



Obr. 199. Jednoduché smyčkové vinutí nekřížené.
(Komutující cívky jsou nakresleny čárkovaně)

b) *křížené* – postupuje směrem doleva, komutátorový krok $y_k = -1$; $y_2 > y_1$ (číselně).

Křížené vinutí se málo používá, neboť se spojky zbytečně křížují a čela se po obvodu hůře ukládají.

Protože u smyčkového vinutí se připojuje k cívkám postupně jedna lamela za druhou, není v zásadě počet lamel a tím i počet drážek omezen.

Vzhledem k magnetické souměrnosti musí být však počet lamel smyčkového vinutí dělitelný počtem pólových dvojic.

Zbývající pravidla budou odvozena postupně.

Na obr. 199 je jednoduché nekřížené smyčkové vinutí čtyřpólového stroje s údaji

$$2p = 4, \quad Q = 8, \quad K = 8, \quad y_1 = 5, \quad y = 2, \\ y_2 = y - y_1 = 2 - 5 = -3$$

Drážkový krok

$$y_{d1} = 2 \text{ drážky}$$

počet lamel na drážku

$$u = 1$$

takže v drážce jsou jen dvě cívkové strany.

V poloze, která je na obrázku, jsou současně v neutrální poloze čtyři cívky

$$15-4, \quad 3-8, \quad 7-12, \quad 11-16$$

Tyto komutující cívky (nakreslené čárkovaně) musí být kartáči spojeny nakrátko. Proto jsou v daném případě potřebné čtyři kartáče rovnoměrně rozdělené po obvodu komutátoru. Je vidět, že jsou v osách pólů, mají-li spojit lamely komutujících cívek.

Jestliže se zvolí polarita a směr otáčení kotvy, můžeme pravidlem pravé ruky určit smysly indukovaných napětí v jednotlivých vodičích a pomocí nich polaritu kartáčů (obr. 199).

Z obrázku 199 můžeme odvodit pravidlo:

U nekříženého vinutí jsou při otáčení doprava záporné kartáče v ose severních pólů. U kříženého vinutí jsou v ose severních pólů kladné kartáče.

Těchto pravidel můžeme použít při zjišťování správné polarity kartáčů nebo pólů na hotových strojích v provozu.

Stejná pravidla platí pro vlnová vinutí, používá-li se cívek se souměrnými vývody.

Vysledováním cívek mezi jednotlivými kartáči můžeme zjistit, že kartáče je spojují do čtyř paralelních větví. Kdyby se stejně zjišťoval počet paralelních větví mnohopólového smyčkového vinutí, bylo by možné odvodit všeobecné pravidlo:

U smyčkového vinutí se počet paralelních větví rovná počtu pólů

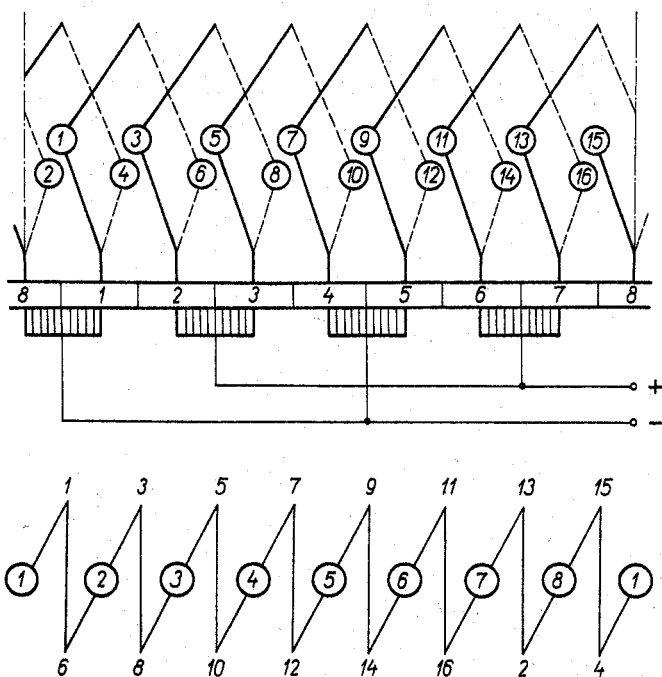
$$2a = 2p \quad (343)$$

Protože jen kartáče spojují vinutí do paralelních větví, musí být na stroji $2p$ sběracích kartáčů. Kartáče stejné polarity se paralelně spojí.

Protože smyčkové vinutí vytváří větší počet paralelních větví, nazývá se *paralelní vinutí*.

Kreslení schématu vinutí podle obr. 199 není vhodné. Na obr. 200 je stejné vinutí v rozvinutém pohledu a jeho náhradní schéma.

V *náhradním schématu*, kterým můžeme dokonale zobrazit vinutí i bez kreslení konstrukčního schématu, se kroužkem označují lamely a jejich spojení s cívkovými stranami. Číslo předních stran jsou v horní části a čísla zadních stran ve spodní části schématu.



Obr. 200. Smyčkové vinutí z obr. 199 a jeho náhradní schéma

Mnhopólové smyčkové vinutí musí být doplněno tzv. *vyrovnávacími spojkami*, jimiž se navzájem spojují lamely se stejným potenciálem tak, aby se případné vyrovnávací proudy vyvolané výrobní nepřesností jimi mohly uzavírat, a aby tak nebyly kartáče zbytečně zatěžovány.

Podrobněji jsou smyčková vinutí probrána ve III. dílu.

5.3.4. Vlnové (sériové) vinutí

Cívky vinutí s předními spojkami připomínají vlny (obr. 197b). Cívka s krokem rovnajícím se přibližně pólové rozteči se připojuje na dvě lamely, vzdálené od sebe o dvě pólové rozteče.

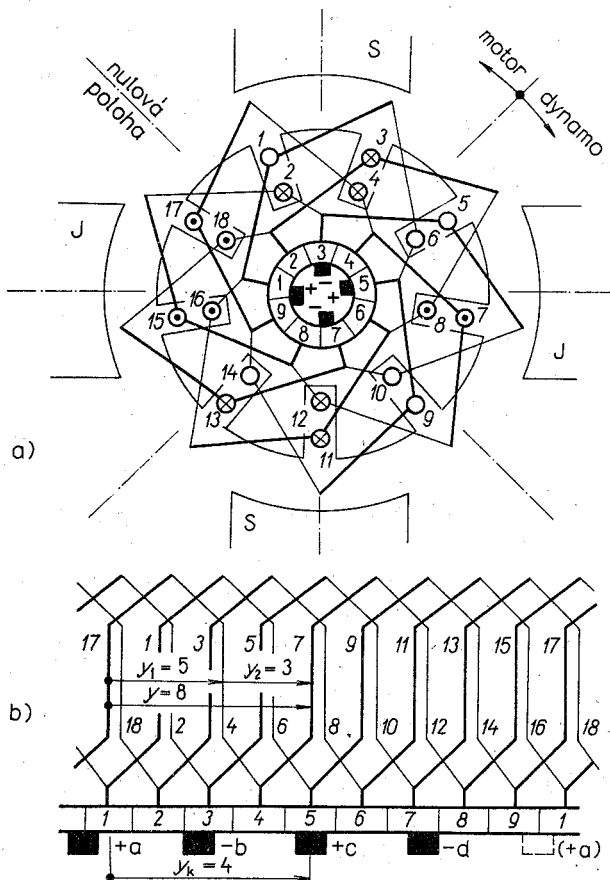
Protože se začátky a konce cívek nepřipojují na sousední lamely jako u smyčkového vinutí, nelze zhotovit vlnové vinutí s libovolným počtem lamel.

Kdybychom např. navrhli čtyřpólové vinutí s osmi lamelami, uzavřelo by se po obejití dvou cívek a ostatní lamely by zůstaly neobsazeny.

Na obr. 201 je zkusmo sestrojené schéma čtyřpólového vinutí pro $Q = K = 9$. Vinutí vyšlo do sebe uzavřené a z něho můžeme odvodit základní pravidla pro jeho konstrukci.

Drážkový krok je opět

$$y_{d1} \doteq Q_p = \frac{Q}{2p} \quad (344)$$



Obr. 201. Jednoduché vlnové vinutí
a) konstrukční schéma, b) rozvinuté schéma

$$y_{d1} = \frac{9}{4} = 2,25$$

pro $u = 1$ se musí zaokrouhlit na celé číslo, takže volíme

$$y_{d1} = 2 \text{ drážky}$$

Komutátorový krok pro $u = 1$ musí být dvojnásobný, tedy

$$y_k = 2y_{d1} \quad (345)$$

$$y_k = 2 \cdot 2 = 4 \text{ lamely}$$

Zadní krok stranový je stejně jako u smyčkového vinutí

$$y_1 = 2uy_{d1} + 1 \quad (346)$$

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

Celkový stranový krok se podle obr. 197b rovná dvěma pólovým roztečím, tedy i dvojnásobku komutátorového kroku

$$y = 2y_k \quad (347)$$

Pro náš příklad tedy platí

$$y = 2 \cdot 4 = 8 \text{ stran}$$

Tomu odpovídá přední stranový krok

$$y_2 = y - y_1 \quad (348)$$

tedy

$$y_2 = 8 - 5 = 3 \text{ strany}$$

(u vlnového vinutí vychází kladný).

Na obr. 201 můžeme zjistit, že po obejití dvou (obecně p) cívek přijde konec poslední cívky na lamelu sousedící s první, na níž je připojen začátek první cívky.

V popisovaném vinutí je na lamelu 1 připojen začátek skupiny cívek (1-6) a (9-14). Konec této skupiny vyšel na sousední lamelu 9.

Z této skutečnosti vyplývá pravidlo:

Počet lamel vlnového vinutí musí být o jednu větší nebo menší než počet lamel na jednu pólovou dvojici, tedy

$$K = py_k \pm 1 \quad (349)$$

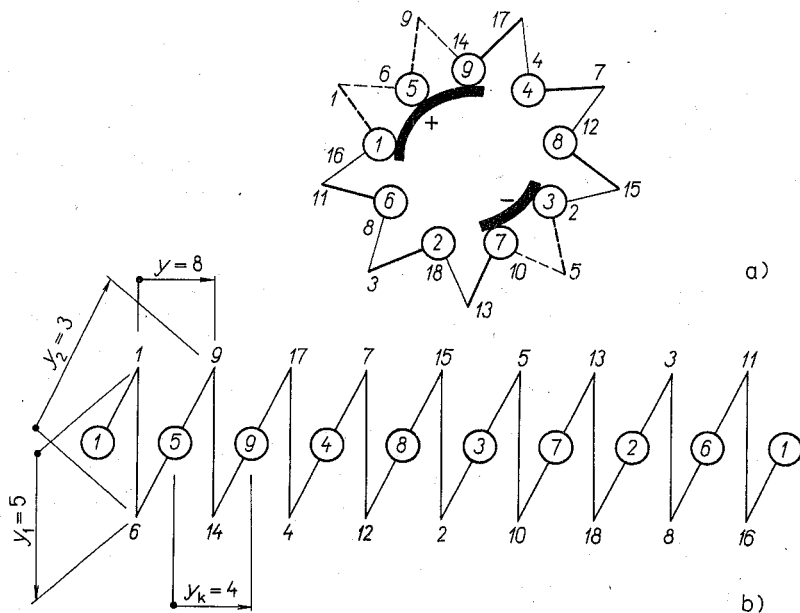
Zvolíme-li $+1$, vyjde vinutí nekřížené, pro -1 vyjde méně používané křížové vinutí, u něhož konec skupiny p cívek křížuje jejich začátek o jednu lamelu.

Na obr. 201 byly zkusmo zvoleny čtyři kartáče (stejně jako u smyčkového vinutí) a jsou umístěny opět v ose pólů. Je zřejmé, že jsou jimi spojeny nakrátko ty cívky, které jsou právě v neutrální poloze:

cívka $(5-10)$ zkratované kartáči $b-d$

cívka $(1-6)$ a $(9-14)$ zkratované kartáči $a-c$.

Jestliže se (podobně jako v příkladu na obr. 199) zvolí směr otáčení vpravo, vyjdou kartáče v ose severních pólů záporné (podobně jako u smyčkového vinutí).



Obr. 202. Vlnové vinutí z obr. 201
a) komutátorové schéma, b) náhradní schéma

Náhradní schéma vinutí je na obr. 202b.

Rozdělení vinutí na paralelní větve zjistíme z *komutátorového schématu* (obr. 202a), přeneseme-li do něj rozložení kartáčů z obr. 201. Záporné kartáče leží na lamelách 7 a 3, kladné kartáče na lamelách 1, 5 a 9. Je vidět, že kartáče stejné polarity vycházejí vedle sebe.

U vlnového vinutí by tedy stačily jen dvě řady kartáčů. Aby však pro daný proud nemusely být značně dlouhé a neprodužovaly komutátor, dávají se i u vlnového vinutí na každou pólovou dvojici dva kartáče.

Z komutátorového schématu je vidět, že pro čtyřpólový stroj vyšly jen dvě paralelní větve. Přezkoumáním vinutí pro více pólů bychom dokázali, že u vlnového vinutí vycházejí vždy jen dvě paralelní větve, tedy

$$2a = 2 \quad (350)$$

Je to nejmenší možný počet větví pro stejnosměrné vinutí, jemuž odpovídá největší možný počet cívek spojených do série. Proto se vlnové vinutí nazývá také *sériové* a jako takové je vhodné pro stroje na vyšší napětí a menší proudy. Zvlášť je vhodné pro dráhové motory.

Každá větev vlnového vinutí prochází pod všemi pólovými dvojicemi, takže případné magnetická nesouměrnost magnetických toků se vyrovná a vinutí nepotřebuje vyrovnávací spojky.

Poznámka. Návrh vinutí s větším počtem lamel na drážku a další druhy stejnosměrných vinutí jsou uvedeny ve III. dílu učebnice.

5.4. MAGNETICKÝ OBVOD STEJNOSMĚRNÉHO STROJE

5.4.1. Magnetické pole

U stejnosměrných strojů nemusí být napětí indukované ve vinutí kotvy sinusové, protože se komutátorem usměrňuje. Proto ani magnetické pole pólů nebývá sinusové, ale co nejmíc obdélníkové, aby byl stroj dobře magneticky využit.

Stálou magnetickou indukci pod pólem zabezpečí konstantní vzduchová mezera mezi povrchem kotvy a pólovým nástavcem. Plynulého přechodu pole do nuly v neutrální poloze se dosáhne mírným zvětšením vzduchové mezery na okrajích nástavců (obr. 194a).

Šířka pólového nástavce se nazývá pólové krytí a vyjadřuje se násobkem pólového rozteče α_p .

Pólové krytí bývá

u strojů bez komutačních pólů $\alpha = 0,70$ až $0,80$,

u strojů s komutačními póly $\alpha = 0,65$ až $0,70$.

Aby se velikost magnetického toku jednoho pólu dala jednoduše vyjádřit, nahradí se jeho skutečný přibližně lichoběžníkový průběh průběhem obdélníkovým (obr. 194b)

$$\Phi = B_{\delta} l_e \alpha t_p \quad [\text{Wb}; \text{T}, \text{m}, \text{m}] \quad (351)$$

kde l_e je efektivní délka pólu.

Ze známého magnetického toku můžeme určit magnetickou indukci

$$B_{\delta} = \frac{\Phi}{l_e \alpha t_p} \quad (352)$$

5.4.2. Napětí indukované ve vinutí

Napětí se indukuje ve vodičích kotvy s efektivní délkou l_e , pohybujících se v magnetickém poli s indukcí B_{δ} rychlostí v . V jednom vodiči je napětí

$$u_i = B_{\delta} l_e v \quad (353)$$

Na kotvě je celkově N závitů spojených do $2a$ paralelních větví, takže v každé větvi je do série zapojeno

$$N_s = \frac{N}{2a} \text{ závitů} \quad (354)$$

a tedy $2N_s$ vodičů. Z nich jen část α je současně v homogenním poli, takže celkové napětí indukované ve vinutí je

$$U_i = B_{\delta} l_e v 2N_s \alpha \quad (355)$$

Za magnetickou indukci B_{δ} můžeme dosadit z (352) a za obvodovou rychlost

$$v = \frac{\pi d n}{60} = \frac{2 p t_p n}{60} \quad (356)$$

neboť obvod stroje πd vyjádřený pólovou roztečí je $2 p t_p$.

$$U_i = \frac{\Phi}{l_e \alpha t_p} l_e \frac{2 p t_p n}{60} 2 N_s \alpha$$

a z toho po vykrácení vyjde

$$U_i = 4 \frac{p n}{60} \Phi N_s = 4 \frac{p n}{60} \Phi \frac{N}{2a} \quad (357)$$

Výraz

$$\frac{pn}{60} = f \quad (358)$$

představuje kmitočet napětí indukovaného ve vodičích střídavě pod severním a jižním pólem, takže je

$$U_i = 4\Phi f N_s = 4\Phi f \frac{N}{2a} \quad (359)$$

Vztah je podobný rovnici pro napětí indukované ve vinutí točivým magnetickým polem.

5.4.3. Magnetomotorické napětí

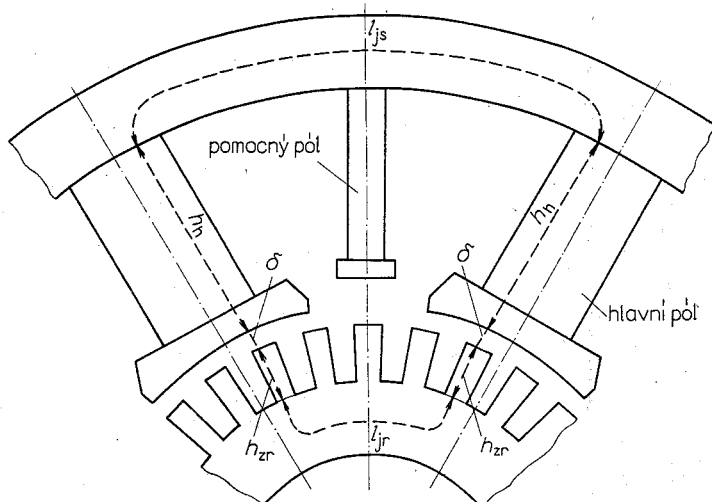
Určí se stejně jako u ostatních strojů ze součtu magnetických napětí, potřebných k protlačení magnetického toku přes jednotlivé úseky obvodu jedné pólové dvojice (obr. 203).

Výpočet těchto napětí je uveden ve III. dílu učebnice.

Potřebné magnetomotorické napětí vytváří budicí proud I_b , procházející závity budících cívek obou hlavních pólů

$$F = 2I_b N_h \quad (360)$$

kde N_h je počet závitů na jednom pólu.



Obr. 203. Magnetický obvod stejnosměrného stroje

5.4.4. Charakteristika naprázdno

Magnetomotorické napětí F vyvolá v magnetickém obvodu stroje magnetický tok Φ . Každému jinému magnetomotorickému napětí (nebo budičího proudu) odpovídá jiný magnetický tok. Protože v magnetickém obvodu je převážně železo, není vztah mezi veličinami F a Φ lineární. Závislost magnetického toku na magnetomotorickém napětí

$$\Phi = f(F) \quad \text{nebo} \quad \Phi = f(I_b)$$

je dána *magnetizační křivkou* celého obvodu a má průběh podle obr. 204a.

Tečna U_δ představuje magnetické napětí pro vzduchovou mezeru.

Pro stálé otáčky je indukované napětí přímo úměrné magnetickému toku, takže průběh magnetizační křivky udává současně v jiném měřítku závislost indukovaného napětí na magnetomotorickém napětí. Zanedbáme-li úbytky napětí, udává i průběh svorkového napětí v závislosti na magnetickém toku při stálých otáčkách.

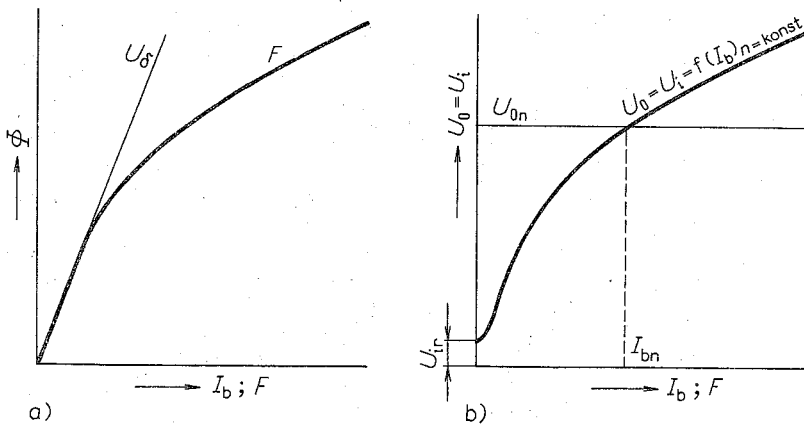
Závislost

$$U_i = U_0 = f(F)_{n=\text{konst}}$$

nebo

$$U_i = U_0 = f(I_b)_{n=\text{konst}}$$

je *charakteristika naprázdno* neboli tzv. *vnitřní charakteristika* stejnosměrného stroje (obr. 204b).



Obr. 204. Stejnoseměrný stroj naprázdno
a) magnetizační čára obvodu, b) charakteristika naprázdno

Vlivem remanentního pole se v magnetickém obvodu indukuje i při nulovém budicím proudu určité napětí U_{ir} , jež se využije pro samonabuzení stejnosměrných strojů.

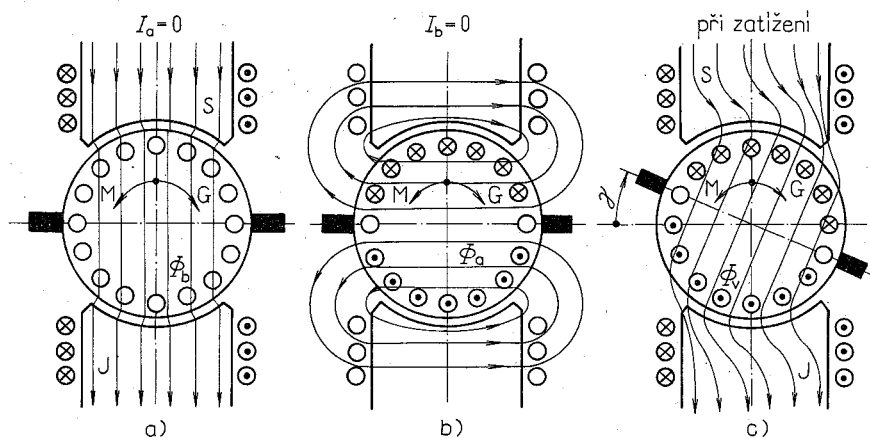
5.5. REAKCE KOTVY

5.5.1. Vznik reakce kotvy

Reakce kotvy se nazývá zpětné působení proudu v kotvě na hlavní magnetické pole, jímž byl tento proud indukován.

Pokud vinutím kotvy neprochází žádný proud, uplatňuje se při ideálním chodu naprázdno jen pole hlavních pólů, jehož osa souhlasí s geometrickou osou pólů (obr. 205a). Nulová poloha je kolmá k ose magnetického pole. Jestliže stroj zatížíme, prochází vinutím kotvy proud, jehož smysl pro zvolený smysl otáčení můžeme určit pravidlem pravé ruky. Podle obr. 205b budeme smysl proudu pod severním pólem (proud do stroje) považovat za kladný. Cívkou, jejíž strany jsou v neutrální poloze, proud neprochází.

Proud ve vodičích kotvy spolu se závitů kotvy představuje určité magnetomotorické napětí F_a , které budí v kotvě magnetický tok Φ_a . Polaritu tohoto reakčního magnetického toku můžeme určit Ampérovým pravidlem.



Obr. 205. Reakce kotvy stejnosměrného stroje

Hlavní tok Φ_b a reakční tok Φ_a se skládají ve výsledný tok Φ_v podle obr. 205c. Osa výsledného magnetického pole je v dynamu natočena ve směru otáčení a v motoru proti směru otáčení rotoru. Tím se současně posune i neutrální osa, která je vždy kolmá na směr indukčních čar.

5.5.2. Vliv reakce kotvy

Na obr. 206a je rozvinuta jedna pólová rozteč a jsou v něm přibližně nakresleny průběhy hlavního pole, pole kotvy, reakčního pole a výsledného pole.

Předpokládáme lichoběžníkový průběh hlavního magnetického toku, severní pól má magnetický tok orientovaný směrem dolů, jak z něho vystupují indukční čáry. Čára b udává průběh magnetomotorického napětí kotvy, jež uvažujeme jako souvislou proudovou vrstvu, rovnoměrně rozloženou po obvodu kotvy. Polaritu zvolíme podle Ampérova pravidla pro zvolený smysl proudu podle toho, zda uvažujeme dynamo nebo motor.

Maximální magnetomotorické napětí je právě uprostřed mezi severním a jižním pólem a směřuje dolů. Do stran se rovnoměrně zmenšuje k nule v ose pólů a dále přechází do záporných hodnot.

Kdyby mezi póly a obvodem kotvy byla stálá vzduchová mezera, byla by její vodivost po celém obvodu stroje stejná a průběh reakčního magnetického toku by byl všude úměrný jen reakčnímu magnetomotorickému napětí podle Hopkinsonova zákona.

Vodivost vzduchové mezery však není všude stejná, a proto průběh reakčního magnetického toku neodpovídá přesně průběhu reakčního magnetomotorického napětí. Zobrazuje ho čára c. V prostoru mezi pólovými nástavci je vodivost malá a reakční magnetický tok je také malý. Pod póly, kde je vzduchová mezera stejná, sleduje přesně průběh reakčního magnetomotorického napětí F_a . Výsledný magnetický tok, daný součtem toků Φ_b a Φ_a , zobrazuje čára d.

Z průběhu výsledného toku můžeme zjistit vliv reakce kotvy.

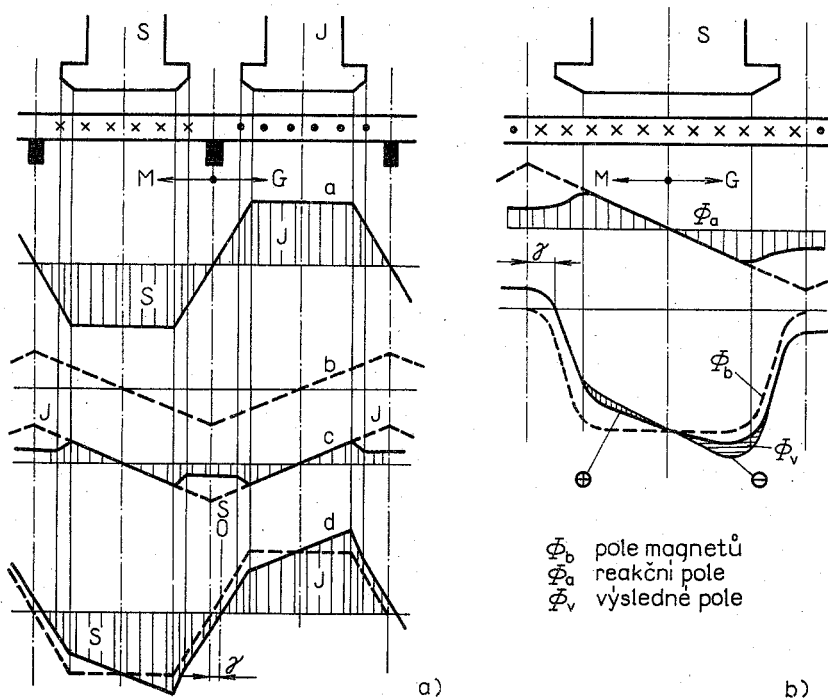
1. Průběh magnetického toku ve stroji se při zatížení deformuje. Magnetická indukce pod pólem není konstantní, maximální hodnotu má pod okrajem pólového nástavce. Pole jakoby se hrnulo na jednu stranu: u dynamu ve směru točení, u motoru proti směru točení.

2. Nulová poloha se působením reakce kotvy posouvá z geometrické nulové polohy o úhel γ .

3. Magnetický tok jednoho pólu se teoreticky nezměnil, neboť šrafované plošky „a“ i „d“ jsou stejné.

4. Ve skutečnosti reakce kotvy výsledný magnetický tok jednoho pólu zmenšuje. Železo v místě maximální indukce je více syceno, jeho magnetický odpor je větší a při stejném magnetomotorickém napětí může

příslušným místem procházet jen menší tok (obr. 206b). Kdyby nebylo vlivu přesycení železa, měl by výsledný tok průběh označený Φ_v . Pod pravým pólovým nástavcem se však přesycením tok zmenší a pod levým pólovým nástavcem je vlivem menšího sycení tok větší než vychází podle jednoduchého geometrického součtu. Tento přírůstek, šrafovaný svisle, nevyrovná však úbytek toku, šrafovaný vodorovně.



Obr. 206. Vliv reakce kotvy

a) deformace magnetického toku, b) skutečný průběh magnetického toku vlivem přesycení železa,

Φ_b – magnetický tok hlavních pólů, Φ_a – magnetický tok reakce kotvy, Φ_v – výsledný magnetický tok

5. Zmenšení toku má za následek zmenšení indukovaného napětí, což se např. u dynamu projeví zmenšením svorkového napětí.

6. Zvětšením magnetické indukce pod okrajem pólu se zvětší ztráty v železe, především v zubech kotvy.

7. Velikost reakčního toku, a tedy i jeho vliv se mění se zatížením. Proto se se změnou zatížení mění i neutrální poloha, takže by bylo potřebné při každém zatížení přestavovat polohu sběracích kartáčů.

5.5.3. Kompenzace reakce kotvy

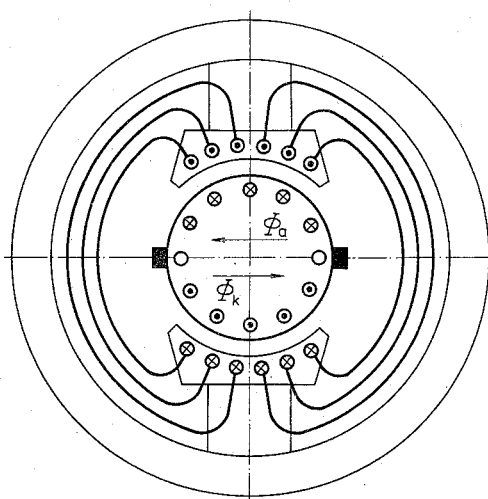
Vliv reakce kotvy můžeme vyloučit nebo zmírnit:

1. zvětšením magnetomotorického napětí hlavních pólů;
2. zkrácením kroku – nepoužívá se, neboť je nevhodné;
3. zvětšením magnetického odporu v cestě reakčního toku, např. podélným zářezem v ose pólu – způsob používaný u prvních stejnosměrných strojů;

4. částečné potlačení reakce v okolí neutrální polohy umožňují *komutační póly*, jejichž hlavní úlohou je zlepšit komutaci;

5. úplné potlačení reakce zabezpečí *kompenzační vinutí*. Jestliže reakční magnetické pole stejnosměrného stroje stojí a neotáčí se jako např. u synchronních trojfázových strojů, lze ho zrušit stejně velkým stojícím polem, které vybudí proud kotvy v závitech kompenzačního vinutí uloženého v pólových nástavcích a zapojeného do série s kotvou. Zapojení je takové, že kompenzační pole je orientováno proti reakčnímu poli kotvy.

Při změně zatížení se mění i proud kompenzačního vinutí, takže působí stejně při jakémkoli zatížení.



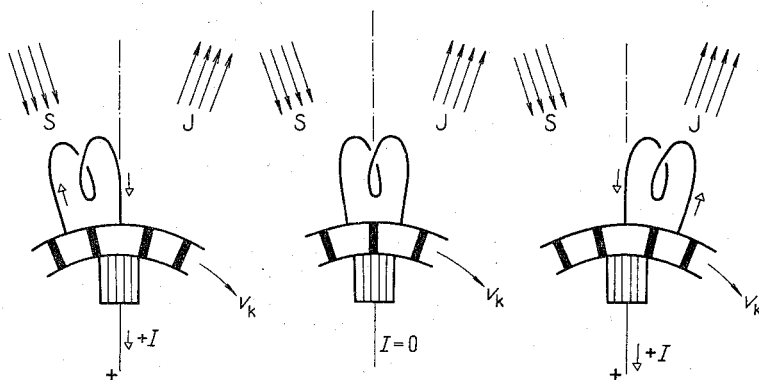
Obr. 207. Schéma kompenzačního vinutí

Kompenzační vinutí se vkládá do polozavřených nebo zavřených drážek v pólových nástavcích a jeho čela se obvykle neizolují. Čela jsou upravena podle obr. 207. Výroba kompenzačního vinutí je nákladná, proto se používá jen u velkých strojů pracujících při značně proměnném zatížení (těžní stroje, válcovací motory atd.).

5.6. KOMUTACE

5.6.1. Základní vztahy

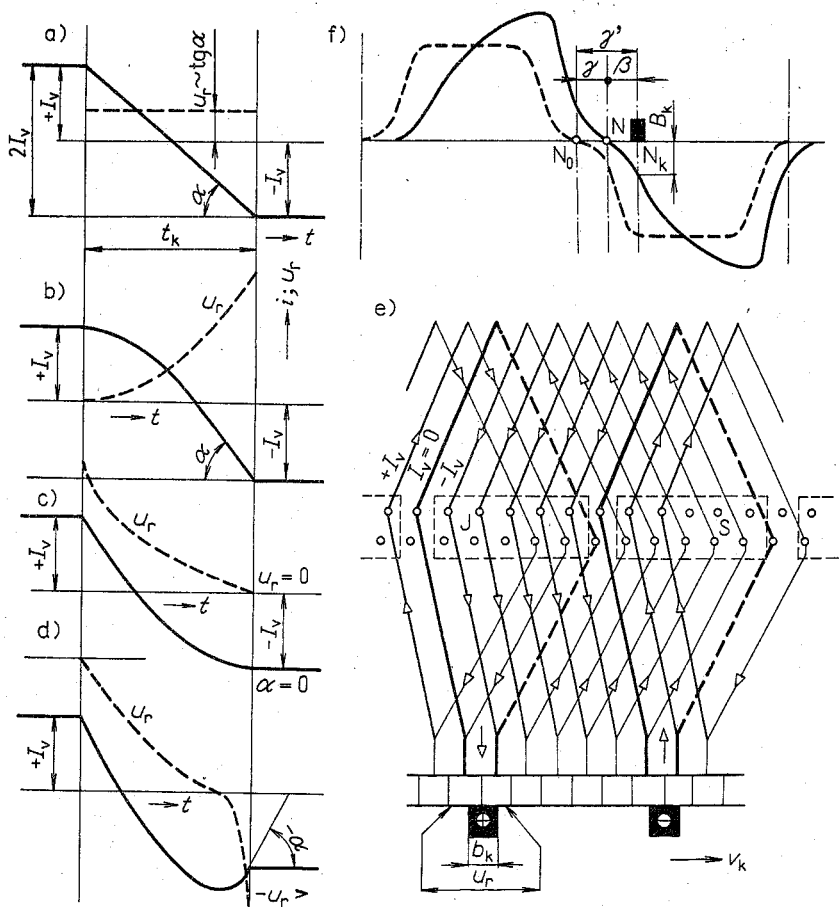
Kartáč, který klouže po lamelách komutátoru, připojuje k síti postupně jiné cívky rotorového vinutí tak, že jejich polarita se trvale nemění. Aby kartáč z lamely na lamelu přecházel bez proudu — bez jiskření, musí se dotýkat těch lamel, jejichž cívky jsou v nulové poloze.



Obr. 208. Změna smyslu proudu v komutující cívce

Průběh změny proudu v jedné cívce je nakreslen na obr. 208. Cívka zapojená na dvě sousední lamely se otáčí doprava. V obrázku je nakreslen její přechod od severního pólu pod jižní pól. Polarita kartáče odpovídá vyznačenému smyslu proudu. V další poloze je cívka nakreslena v neutrální ose, kartáč ji spojuje nakrátko a proud jí neprochází. Přejde-li dále pod jižní pól, změní se sice smysl proudu, ale polarita kartáče zůstane nezměněna.

Tato změna není však ve skutečnosti tak jednoduchá. Cívka má jistou šířku, takže její všechny vodiče nemohou být současně v nulové poloze.



Obr. 209. Komutace stejnosměrného stroje

- a) odporová komutace, b) indukční komutace, c) správná komutace, d) překomutováno, e) průběh komutace v cívice smyčkového vinutí, f) zlepšení komutace posunutím kartáčů z neutrální polohy

Kromě toho má kartáč určitou šířku, takže spojuje nakrátko více cívek, které ale nemohou být současně v neutrální ose. Komutace je tedy složitý přechodný jev, který lze zjednodušeně zkoumat podle obr. 209e, na němž je nakreslena část smyčkového vinutí.

Všimneme si levě, tlustěji vytažené cívky, která právě komutuje. Na obrázku se v ní mění proud z kladné hodnoty na zápornou. Doba, po

kteřou komutace trvá, závisí na šířce kartáče a obvodové rychlosti komutátoru

$$t_k = \frac{b_k}{v_k} \quad (361)$$

Kdyby cívka neměla žádnou indukčnost, probíhala by změna proudu z hodnoty $+I_v$ na hodnotu $-I_v$ lineárně podle obr. 209a. Tato tzv. přímková nebo odporová komutace je možná jen tehdy, jestliže činný odpor obvodu cívky je podstatně větší než její reaktance.

Cívka má však velkou indukčnost, takže změnou proudu se v ní indukuje reaktanční napětí

$$u_r = L_c \frac{di}{dt} \quad (362)$$

Uvažujeme-li změnu proudu z kladné hodnoty na zápornou, je výraz di/dt záporný, proud zaniká a indukované reaktanční napětí má podle Lencova pravidla takový smysl, že se snaží trvání proudu v komutující cívce prodloužit.

Jeho působením proud zpočátku klesá pomalu, takže na konci komutace je jeho změna velmi značná (obr. 209b). Touto změnou proudu se indukuje velké reaktanční napětí u_r právě v okamžiku, kdy lamela opouští kartáč, a pomáhá tak vzniku oblouku mezi kartáčem a lamelou. Proto stroj jiskří. Je to tzv. *indukční komutace*.

Pozor!

Protože L_c je indukčnost jedné cívky, udává rovnice (362) napětí u_r indukované v jedné cívce. U vlnového vinutí je však mezi dvěma sousedními lamelami zapojeno obecně p cívek, takže napětí u_r je také p krát vyšší.

Aby rovnice platila stejně pro oba druhy vinutí, doplní se zlomkem p/a , který udává počet cívek mezi sousedními lamelami bez ohledu na druh vinutí.

U smyčkového vinutí je $p = a$ a zlomek $p/a = 1$, u vlnového vinutí je $a = 1$, takže $p/a = p$.

Potom platí

$$u_r = L_c \frac{di}{dt} \cdot \frac{p}{a} \quad (363)$$

Vezmeme-li v úvahu přímkovou změnu proudu, bude

$$u_r = L_c \frac{2I_v}{t_k}$$

Jeho střední hodnota je

$$U_{rs} = A_c N_c^2 \frac{2I_v}{\frac{b_k}{v_k}} \cdot \frac{p}{a} = 2A_c N_c^2 I_v \frac{v_k}{b_k} \cdot \frac{p}{a} \quad (364)$$

kde A_c je rozptylová vodivost jedné cívky,

N_c počet závitů jedné cívky.

Obvodovou rychlost komutátoru lze vyjádřit z rychlosti kotvy

$$v_k = v \frac{d_k}{d} \quad (365)$$

a šířka lamely z obvodu komutátoru

$$b_k = \frac{\pi d_k}{K} \quad (366)$$

takže po dosazení do (364) dostaneme

$$U_{rs} = 2A_c N_c^2 I_v v \frac{d_k K}{\pi d} \cdot \frac{p}{a}$$

$$U_{rs} = 2A_c N_c^2 I_v v \frac{K}{\pi d} \cdot \frac{p}{a}$$

Počet lamel K udává současně i počet cívek majících N_c závitů a $2N_c$ vodičů, kterými prochází proud I_v , takže výraz

$$\frac{2N_c I_v K}{\pi d} = A$$

představuje proudové zatížení na obvodu kotvy [$A \text{ m}^{-1}$]. Potom platí

$$U_{rs} = A_c N_c A v \frac{p}{a} \quad (367)$$

Veličinu A_c můžeme vyjádřit vztahem

$$A_c = 2\xi l_e$$

kde ξ je rozptylová vodivost drážkového prostoru a částí kolem čel, uvažovaná na jednotku délky železa (Hobartovo číslo).

Tato veličina se málo mění a bývá $\xi = (4 \text{ až } 8) \cdot 10^{-6} \text{ H m}^{-1}$, přesně ji lze počítat stejně jako u indukčních strojů.

Střední hodnota reaktančního napětí je tedy

$$U_{rs} = 2\xi l_e N_c A v \quad (368)$$

Vítaná by byla taková komutace, u níž by v okamžiku přerušení spojení mezi lamelou a kartáčem byla velikost napětí u_r nulová. Potom by stroj nejiskřil.

Velikost napětí u_r je nulové pro $dt/di = 0$, kdy i $\operatorname{tg} \alpha = 0$. Tomu odpovídající průběh proudu je nakreslen na obr. 209c a lze ho alespoň přibližně dosáhnout prostředky, které budou ještě popsány.

Nevhodným vykompenzováním vlivu u_r se může stroj i „překomutovat“. Potom proud změni prudce svou velikost, víc než je potřebné, takže ke konci komutace se musí zase prudce vrátit na velikost $-I_v$ (obr. 209d). V okamžiku, kdy lamela opouští kartáč, se v cívce opět indukuje napětí u_r . Je sice opačné polarity, výraz di/dt je kladný, ale pro jiskření je stejně nebezpečné.

5.6.2. Zlepšení komutace

Zlepšení komutace (potlačení jiskření) spočívá v potlačení napětí u_r . To je možné zrušit stejně velkým napětím opačného smyslu, které se indukuje v komutující cívce jejím pohybem ve zvláštním komutačním poli s magnetickou indukcí B_k .

Velikost tohoto napětí je

$$U_k = 2B_k l_e v N_c \frac{p}{a} \quad (369)$$

Porovnáním rovnic (369) a (368) je $U_{rs} = U_k$ a z toho

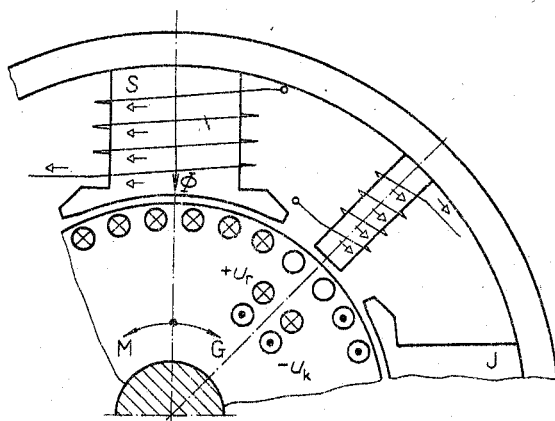
$$B_k = \xi A \quad (370)$$

Potřebné komutační magnetické pole můžeme získat dvojím způsobem:

1. Posunutím kartáčů z neutrální polohy. Tím, že se kartáče posunou z neutrální polohy N_0 (obr. 209f) o úhel γ' do polohy N_k , dostane se komutující cívka do magnetického pole sousedního pólu, do místa s indukcí B_k . Posunutí musí být tak velké, aby indukce B_k odpovídala rovnici (370). Posunutí musí být umožněno natáčivou konstrukcí držáků kartáčů.

U dynam je třeba kartáče vysunout ve směru otáčení, u motorů opačně.

2. Použitím komutačních pólů. Jsou to úzké póly, umístěné mezi hlavními póly (obr. 210). Komutační napětí se indukuje pohybem cívky v jejich magnetickém poli. Aby toto komutační napětí rušilo reaktanční napětí u_r , při každém zatížení, je vinutí komutačních (pomocných) pólů zapojeno do série s kotvou.



Obr. 210. Polarita komutačních pólů

Polarita komutačních pólů se určí podle obr. 210. Pod nakresleným komutačním pólem se mění smysl proudu z kladné hodnoty na zápornou – proud zaniká. Reaktanční napětí u_r má tedy takový smysl, aby jeho trvání prodlužovalo, aby ho udržovalo v původním smyslu. Vyznačen je tedy křížky. Komutační napětí potom musí mít smysl opačný – vyznačený tečkami. Pro vyznačený směr otáčení se může takto orientované napětí (podle pravidla pravé ruky) indukovat jen pod jižním pólem. Z toho plyne pravidlo:

U dynama následuje za severním hlavním pólem ve směru točení jižní komutační pól, u motoru naopak severní komutační pól.

Ani pomocné póly nezruší úplně reaktanční napětí, neboť fyzikální podstata obou je jiná. Reaktanční napětí u_r se indukuje časovou změnou proudu v cívce a komutační napětí u_k pohybem cívky v magnetickém poli.

Komutační póly částečně potlačují i reakci kotvy v prostoru mezi póly. Dávají se na všechny stroje s průměrem větším než 0,17 m. Jsou trvale zapojeny do série s kotvou a nemají se přepojovat.

5.6.3. Podmínky dobré komutace

Správná komutace a správný chod stroje se pozná podle bezjiskrového chodu. Jiskření vzniká na výstupní straně kartáče. Může být původu elektrického, ale i mechanického.

Elektrické příčiny jiskření jsou:

1. samotné komutační poměry – velké reaktanční napětí u_r ,
2. velké lamelové napětí.

Lamelovým napětím se rozumí napětí mezi dvěma sousedními lamelami. Kdyby bylo tak velké, že by stačilo udržet oblouk mezi lamelou a kartáčem, protáhl by se oblouk od jednoho kartáče ke druhému a zničil by komutátor i sběrací ústrojí.

Střední hodnota lamelového napětí

$$U_l = \frac{U}{\frac{K}{2p}} = \frac{2pU}{K} \quad (371)$$

může být 15 V u nekompensovaných strojů,

20 V u kompenzovaných strojů.

Reakce kotvy snižuje dovolené napětí mezi lamelami.

Elektrické podmínky dobré komutace jsou:

1. Malé reaktanční napětí.
2. Maximální hodnota lamelového napětí podle rovnice (371) může být 25 až 50 V.

3. Důležité stroje mají vzhledem k dobré komutaci smyčkové vinutí s vyrovnávacími spojkami.

4. Při několika lamelách na jednu drážku můžeme komutaci zlepšit použitím přestupného vinutí.

Mechanické podmínky dobré komutace jsou:

1. Komutátor musí být přesně válcový.
2. Nesmí měnit svůj tvar působením odstředivé síly ani při největších rychlostech.

3. Povrch komutátoru musí být vyleštěn.

Aby se povrch komutátoru rovnoměrněji opotřebovával, jsou kartáče na jeho obvodu přesazeny. Kartáče dvou polarit, jdoucí za sebou, musí přitom klouzat po stejných drahách.

4. Rozteč sběracích svorníků musí být po celém obvodu stejná s přesností na desetinu milimetru.

5. U strojů s komutačními póly musí kartáče dosedat přesně v nulové poloze.

6. Vedení kartáčů v držáku nesmí být ani volné, ani příliš těsné.

7. Osy sběracích svorníků musí být rovnoběžné s podélnou osou komutátoru.

8. Kartáče musí mít přiměřenou tvrdost a všechny kartáče na stroji musí být stejné značky.

9. Výrobce předepsaný tlak na kartáče se musí dodržet.

10. Protože se měď lamel rychleji opotřebovává než mikanitová izolace mezi nimi, je třeba ji vyškrabat do hloubky asi 1 až 2 mm.

11. Kartáče je třeba na dosedací ploše zabrousit do zrcadlového lesku a na povrchu komutátoru se musí při správné činnosti vytvořit tenký film z kyslíčků mědi, částecek uhlíku a vlhkosti. Tento přirozený film se nesmí obrušovat.

Poznámka. Komutace omezuje výkon a otáčky stejnosměrných strojů. Zásadou teoretických prací a měření lze v současné době stavět stroje o výkonu 4000 kW při 1000 min^{-1} .

V současné době se konají pokusy, jejichž cílem je nahradit komutátor tyristory (tzv. statická komutace). Stroj je v inverzním provedení, na statoru má rozložené trojfázové vinutí, buzení je na rotoru.

5.7. DRUHY STEJNOSMĚRNÝCH STROJŮ

5.7.1. Rozdělení

Stejnoseměrný stroj může pracovat jako generátor pro výrobu stejnosměrného proudu – *dynamo* nebo jako *motor*. Po konstrukční stránce není mezi nimi žádný rozdíl.

Buzení stejnosměrných strojů může být:

1. Cizí – budicí vinutí napájené z cizího zdroje (baterie, budicí dynamo); velikost budicího proudu závisí na napětí budicího zdroje.

2. Derivační – budicí vinutí je paralelně připojeno ke kotvě; budicí proud závisí na napětí na jeho svorkách.

3. Sériové – budicí závit jsou zapojeny do série s kotvou a budicí proud se rovná přímo zatěžovacímu proudu.

4. Sdružené – kompaundní, část budicích závitů je připojena paralelně ke kotvě, část s vinutím kotvy do série.

5.7.2. Značky a schémata

Označování svorek a kreslení schémat je předepsáno v normách ČSN 34 3210 a ČSN 35 0009.

1. Začátky vinutí se označují indexem 1, konce indexem 2.
2. Svorčky jednotlivých vinutí se označují písmeny*)

A1, A2 kotva,

K1, K2 kompenzační vinutí,

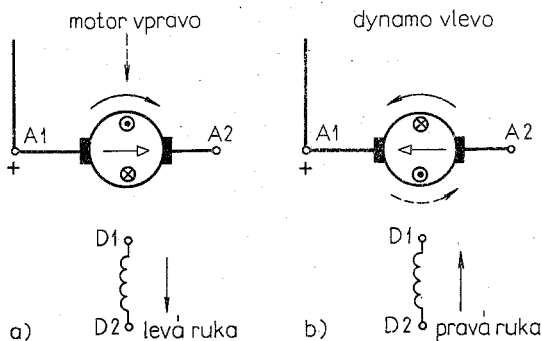
Q1, Q2 komutační póly,

F1, F2 cizí buzení,

D1, D2 derivační vinutí,

S1, S2 sériové vinutí.

3. Schéma pro motor se kreslí obvykle pro směr točení vpravo (při pohledu na hřídel). Schéma pro dynamo se obvykle kreslí pro směr točení vlevo. Tyto směry se považují za normální a stroje se takto vyrábějí, pokud nejsou jiné požadavky.



Obr. 211. Systematika kreslení schémat stejnosměrných strojů

4. Za předpokladu, že jde o normální směr točení motoru, prochází proud jednotlivými vinutími od svorky 1 ke svorce 2 a u dynama opačně (obr. 211). Tato dohoda odpovídá spotřebitelskému systému. Při změně směru točení se smysl proudů změní.

5. Předpokládá se taková úprava vinutí, že smysl proudu v něm souhlasí se smyslem vybuzeného toku. Potom např. smysl proudu v kotvě

*) Pozn. red.: Podle nové ČSN 34 0160 z roku 1976 nazvané Předpisy pro značení svorek a vodičů u elektrických předmětů a zařízení, se mění značení svorek podle tab. 4 na str. 64.

souhlasí se smyslem reakčního toku. Předpokládáme tedy pravotočivé cívký. Šipky ve schématech určují smysl proudu i magnetického toku. Potom i magnetická osa kotvy souhlasí s neutrální polohou kartáčů.

6. Vzhledem k uvedeným předpokladům je třeba pomocné vinutí (komutační i kompenzační) zapojit tak, aby jejich magnetický tok (proud) byl orientován proti smyslu proudu v kotvě. Začátek těchto vinutí se musí spojit se záporným pólem kotvy (A2). Toto spojení je trvalé a nemění se ani při přepojování stroje na jiný směr točení nebo na jinou polaritu.

7. Polarita budicího vinutí vzhledem k polaritě kotvy je odvozena na obr. 211. V kotvě je vyznačen smysl proudu ve vodičích horní a spodní části kotvy, který odpovídá dané polaritě a tím i smyslu magnetického toku v kotvě. Potom polarita budicího vinutí musí být taková, aby u motoru vyhovovala pravidlu levé ruky (síla na vodič) a u dynamu pravidlu pravé ruky. Je zřejmé, že při nezměněném označení svorek vyhovuje nakreslený smysl proudu podmínce z bodu 4.

Z nakresleného obrázku můžeme odvodit všeobecné pravidlo:

Pod špičkou čítačí šipky magnetického toku (proudu) budicího vinutí se kotva točí od kladného kartáče k zápornému.

8. Označení svorek, které odpovídá normálnímu směru točení motoru a dynamu, je třeba zachovat i při přepojení na jiný směr točení nebo pro jinou polaritu.

9. Správné přepojení stroje můžeme navrhnout jen při dodržení uvedených zásad.

5.8. DYNAMA

5.8.1. Základní vztahy a pojmy

Podle vztahu (357) je velikost indukovaného napětí dána vztahem

$$U_i = 4\Phi \frac{pn}{60} N_s = 4\Phi f N_s = C_1 n \Phi \quad (372)$$

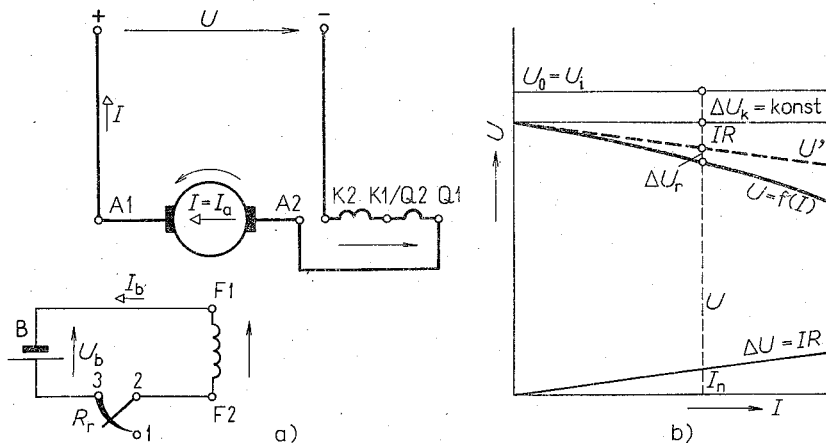
Neproměnné veličiny jsme nahradili společnou konstantou, platnou vždy pro daný stroj

$$\frac{4pN_s}{60} = C_1 \quad (373)$$

Otáčky pohonného motoru jsou obvykle stálé, takže svorkové napětí dynam můžeme řídit změnou magnetického toku, tzn. změnou budicího proudu.

Vlastnosti dynamy se zajišťují v jeho tzv. vnější – *zatěžovací charakteristice*, která udává závislost svorkového napětí na zatěžovacím proudu I , který z dynamy odebíráme, při stálém budicím proudu a stálých otáčkách.

Svorkové napětí je menší o vnitřní úbytky napětí, jejichž velikost je u každého druhu dynamy jiná.



Obr. 212. Dynamo s cizím buzením
a) schéma, b) vnější charakteristika

5.8.2. Dynamo s cizím buzením

Má budicí vinutí napájeno z cizího zdroje, např. z baterie B (obr. 212). První dynamo byla jen s cizím buzením. Napětí dynamy lze řídit změnou budicího proudu, odporem budicího reostatu R_r nebo přímo změnou budicího napětí U_b , jestliže je stroj buzen regulovatelným dynamem (budičem). Dynamo buzené z budiče můžeme hospodárně regulovat ve velmi širokých mezích.

Vnější charakteristika (obr. 212b) je dána vztahem

$$U = U_i - \Delta U_k - IR - \Delta U_r \quad (374)$$

kde U_i je indukované napětí odpovídající nastavenému budicímu proudu z charakteristiky naprázdno ($U_0 = U_i$),

ΔU_k úbytek napětí způsobený přechodovým odporem kartáčů, který nezávisí na zatížení a bývá asi 2 V,

R odpor kotvy, komutačního a kompenzačního vinutí,

ΔU_r úbytek napětí způsobený přesycením železa vlivem reakce kotvy, pokud stroj nemá kompenzační vinutí.

Všechny úbytky napětí jsou poměrně malé, takže napětí s rostoucím zatížením jen nepatrně klesá a dynamo s cizím buzením představuje velmi tvrdý zdroj napětí. Jeho výhodou je, že budicí proud nezávisí na zatížení a neovlivní velikost napětí úbytky v budicím vinutí.

V oblasti jmenovitého proudu je charakteristika téměř přímková. Ohýbat se začne jen při větších proudech, kdy se značně projeví reakce kotvy.

U kompenzovaného stroje odpadá nelineární úbytek napětí ΔU_r , a charakteristika má přímkový průběh U' .

Největší možný proud I_k (proud nakrátko) odpovídá nulovému napětí a je dán vztahem

$$I_k = \frac{U_0 - \Delta U_k}{R} \quad (375)$$

Protože hodnoty ΔU_k i R jsou malé, vychází proud nakrátko značně velký.

Průměrně bývá

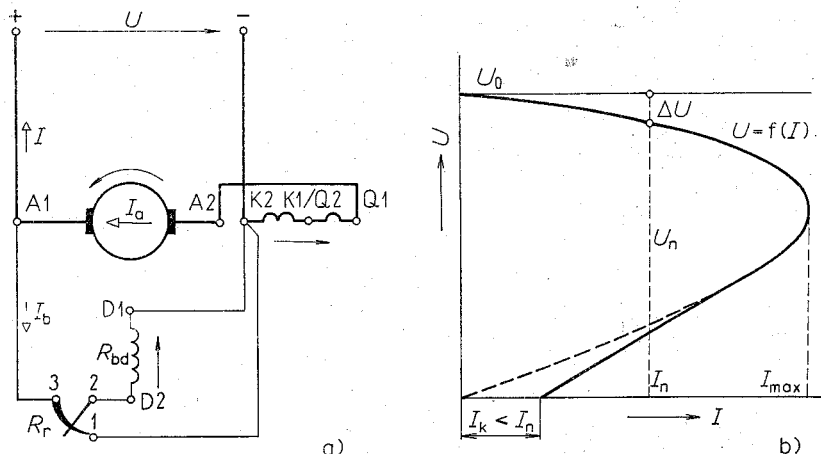
$$I_k = (4 \text{ až } 10) I_n$$

5.8.3. Derivační dynamo

Úplné schéma derivačního (paralelního) dynamo s komutačními póly a kompenzačním vinutím je na obr. 213a.

Kotva je trvale spojena do série s kompenzačním vinutím (K1, K2) i s komutačním vinutím (Q1, Q2) tak, že při jakémkoli přepojení stroje směřuje reakční magnetický tok proti magnetickému toku obou pomocných vinutí.

Budicí vinutí (D1, D2) je připojeno ke kotvě tak, aby při vyznačené polaritě kotvy byl směr jejího otáčení pod špičkou čítací šipky magnetického



Obr. 213. Derivační dynamo
a) schéma spojení, b) vnější charakteristika

toku od kladného kartáče k zápornému a aby proud v budícím vinutí procházel od svorky D2 do D1.

V obvodu budícího vinutí je zapojen budící reostat R_r , způsobem předepsaným v ČSN 34 3210. Má odbuzovací kontakt I , kterým se při vypínání dynama spojí budící obvod nakrátko a energicky odbudí. Jinak by při rychlém rozpojení obvodu s velkou indukčností vznikl v místě přerušení oblouk a vzniklým přepětím by se mohla poškodit izolace vinutí.

Nabuzení dynama i bez cizího zdroje budícího proudu zajišťuje remanentní magnetismus magnetického obvodu. Jím se v otáčející se kotvě vybudí nepatrné napětí, které protlačí budícím vinutím malý proud. Při správném zapojení se tímto proudem remanentní magnetický tok zvětší, což má za následek zvýšení indukovaného napětí a další zvětšení budícího proudu tak, že za krátký čas je dynamo nabuzeno na příslušné napětí.

U derivačního dynama se celkový proud kotvy I_a rozdělí na proud procházející budícím vinutím I_b , a proud I , který dynamo dodává do sítě

$$I_a = I + I_b \quad (376)$$

Vnější charakteristika (obr. 213) je v oblasti jmenovitého proudu podobná charakteristice dynama s cizím buzením. Svorkové napětí je

jen o málo menší než napětí naprázdno U_0 . Nakreslená charakteristika zanedbává nepatrný úbytek napětí ΔU_k , takže vychází z bodu $U = U_0 = U_i$.

Při větších proudech klesá napětí derivačního dynama rychleji než napětí dynama s cizím buzením, neboť s rostoucím zatížením klesá nejen svorkové napětí, ale i jemu úměrný budicí proud daný vztahem

$$I_b = \frac{U}{R_{bd} + R_r} \quad (377)$$

Pokles budicího proudu vyvolá potom další pokles napětí, takže derivační dynamo představuje měkčí zdroj než dynamo s cizím buzením, ale v oblasti jmenovitého proudu je dostatečně tvrdým zdrojem.

Derivační dynamo můžeme zatěžovat jen do určité velikosti proudu I_{max} (obr. 213b). Při dalším zmenšení odporu vnější sítě začne proud rychle klesat působením klesajícího budicího proudu. Při zkratu je svorkové napětí nulové, jemu odpovídající proud je také nulový, takže bez respektování remanentního pole by se zkratový proud rovnal nule. Vlivem určitého remanentního pole má velikost I_k , která je ale menší než jmenovitý proud. *Derivační dynamo se tedy nemůže zkratovým proudem poškodit.*

Napětí řídíme změnou budicího proudu derivačním (budicím) reostatem. Maximální napětí odpovídá úplně vyřazenému reostatu, kdy budicí proud je největší, omezený jen odporem budicího vinutí. Zvětšováním odporu R_r napětí klesá. Úlohou derivačního reostatu je udržet jmenovité svorkové napětí i při značně proměnném zatížení a musí být dimenzován tak, aby zaručil dostatečné buzení i při maximálním dovoleném zatížení.

Závislost svorkového napětí naprázdno na budicím proudu je dána *charakteristikou naprázdno* (obr. 214a).

Pro určité napětí U_{01} je zapotřebí budicí proud I_{b1} , pro který platí

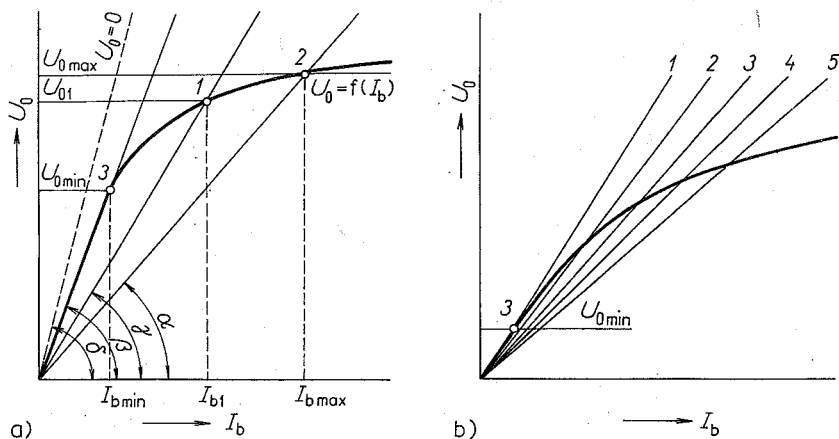
$$I_{b1} = \frac{U_{01}}{R_{bd} + R_{r1}} \quad (378)$$

kde R_{bd} je odpor derivačního vinutí,

R_{r1} nastavená velikost odporu derivačního reostatu.

Z obrázku je vidět, že odpor celého budicího obvodu je úměrný směrnici přímkou jdoucí bodem I

$$R_{bd} + R_{r1} = \frac{U_{01}}{I_{b1}} = \text{tg } \gamma \quad (379)$$



Obr. 214. Řízení napětí derivačního dynama

a) normální charakteristika dynama, b) ohnutá charakteristika budících dynam

Podle toho každému jinému odporu budícího obvodu odpovídá jiná přímka jdoucí počátkem, se směrnici úměrnou velikosti odporu. Její průsečík s charakteristikou udává příslušné svorkové napětí naprázdno.

Maximální napětí $U_{0\max}$ odpovídá jen odporu budícího vinutí R_{bd} (bod 2), pro který platí

$$R_{bd} = \frac{U_{0\max}}{I_{b\max}} = \operatorname{tg} \alpha \quad (380)$$

Nejmenší možné napětí $U_{0\min}$ je určeno průsečíkem 3, ve kterém se odporová přímka dotýká charakteristiky a pro který platí

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{U_{0\min}}{I_{b\min}} = R_{bd} + R_r \quad (381)$$

Pozor! Funkce tangens je třeba vyčíslovat v jednotkách V/A, ne jednoduchým poměrem délek.

Rovnicí (381) je dána maximální možná velikost odporu derivačního reostatu.

Pro konkrétní případ regulace zjistíme potřebný odpor reostatu pomocí charakteristiky naprázdno $U_0 = f(I_b)$ a charakteristiky $U_n = f(I_b)$, která udává závislost svorkového napětí na I_b při jmenovitém zatížení nebo při předpokládaném přetížení.

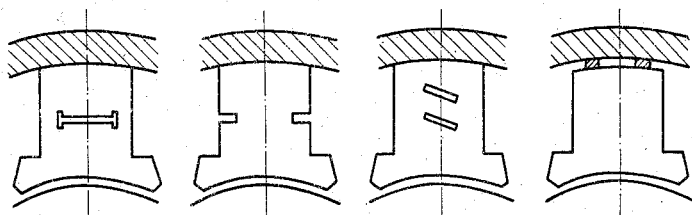
Pro běžné případy bez zvláštních požadavků se volí $R_r = R_{bd}$ a odpor se rozdělí na větší počet stupňů (40 až 100) podle velikosti stroje a požadované jemnosti regulace.

Ještě většímu odporu budicího obvodu by odpovídala přímka se směrnici $\tan \delta$, která však charakteristiku už neprotíná. Při tomto odporu není tedy už možné dynamo nabudit. Bude trvale dávat jen napětí odpovídající remanentnímu poli.

Z obr. 214a je vidět, že stabilně můžeme regulovat napětí jen nad ohybem charakteristiky naprázdno.

Regulace je pod tímto ohybem nestabilní, neboť průsečík 3 je neurčitý.

Napětí budicích dynam např. pro synchronní stroje se musí stabilně regulovat v širokých mezích a už od nejmenších hodnot, proto jejich charakteristika musí být hned za počátkem výrazně ohnutá (obr. 214b). Bod 3 potom odpovídá už malému napětí $U_{0\min}$ a všechny ostatní průsečíky charakteristiky s odporovými přímkami jsou určité.



Obr. 215. Úprava magnetického obvodu budicích dynam

Ohnutí charakteristiky naprázdno dosáhneme přesycením magnetického obvodu už při malých magnetických tocích. Přesycení se dosáhne např. různým zúžením hlavních pólů (obr. 215).

Poznámka. Derivační dynamo musíme spouštět naprázdno, bez zatížení. Jinak by počáteční proud vyvolaný zbytkovým (remanentním) polem procházel z větší části vnější sítí (menší odpor a dynamo by se nabuzovalo velmi pomalu). Při velmi malém odporu vnější sítě, např. při zapojení do zkratu, by se nenabudilo vůbec.

Výhodou derivačního dynamu je, že nepotřebuje cizí budicí zdroj a jeho napětí můžeme hospodárně a jednoduše řídit.

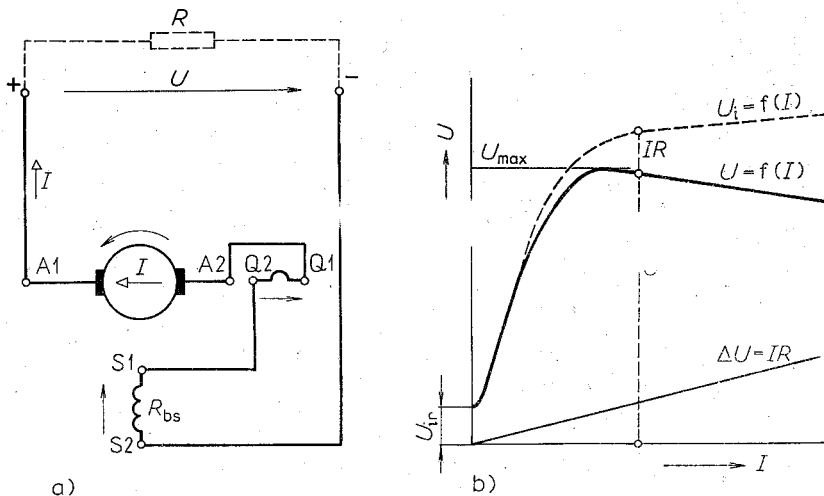
Závislost napětí dynamu na otáčkách se využívá u tzv. tachometrických dynam pro plynulé měření otáček různých strojů.

Poznámka. Remanentní pole nového dynama se vybudí ve výrobním závodě. Jestliže se během provozu zruší (např. chybným zapojením), můžeme ho dodatečně obnovit připojením budicího vinutí na okamžik k vhodnému stejnosměrnému zdroji.

5.8.4. Sériové dynamo

Má budicí vinutí (jako i ostatní vinutí) zapojeno do série s kotvou (obr. 216a). Zatěžovací proud prochází tedy všemi vinutími ($I = I_a = I_b$).

Pokud je dynamo nezatíženo, neprochází jeho budícím vinutím proud a jeho svorkové napětí je nulové (nebo se rovná U_{ir}).



Obr. 216. Sériové dynamo
a) schéma, b) charakteristiky

Sériové dynamo můžeme nabudit jen při zatížení.

Indukované napětí je úměrné zatěžovacímu proudu podle charakteristiky naprázdno. Tuto charakteristiku můžeme stanovit výpočtem nebo nepřímým měřením pomocí buzení z cizího pomocného zdroje. Měřením na skutečném stroji lze určit jen svorkové napětí, které je dáno vztahem

$$U = U_i - IR \quad (382)$$

Vnější charakteristika sériového dynama $U = f(I)$ na obr. 216b se získá odečtením úbytků napětí na vnitřním odporu dynama.

U menších proudů, pokud je magnetický obvod nenasyčen, roste svorkové napětí se zatížením téměř lineárně. Po nasycení obvodu se zvyšuje pomaleji než rostou úbytky napětí, takže svorkové napětí začne klesat. Klesá až do chodu nakrátko, kdy je $U = 0$, takže platí

$$U_i = I_k R$$

a proud nakrátko

$$I_k = \frac{U_i}{R} \quad (383)$$

je velmi velký.

Protože svorkové napětí sériového dynama se velmi mění se zatížením, nemůžeme ho použít pro napájení stejnosměrné sítě.

Změnou vnějšího odporu sítě, např. připojením dalších spotřebičů, by se napětí zpočátku zvyšovalo, připojením dalších by se však začalo snižovat.

Regulátor napětí u sériového dynama nemá význam.

Dnes pracují stejnosměrné stroje jako sériová dynama při brzdění dráhových a jeřábových motorů.

5.8.5. Kompaundní dynamo

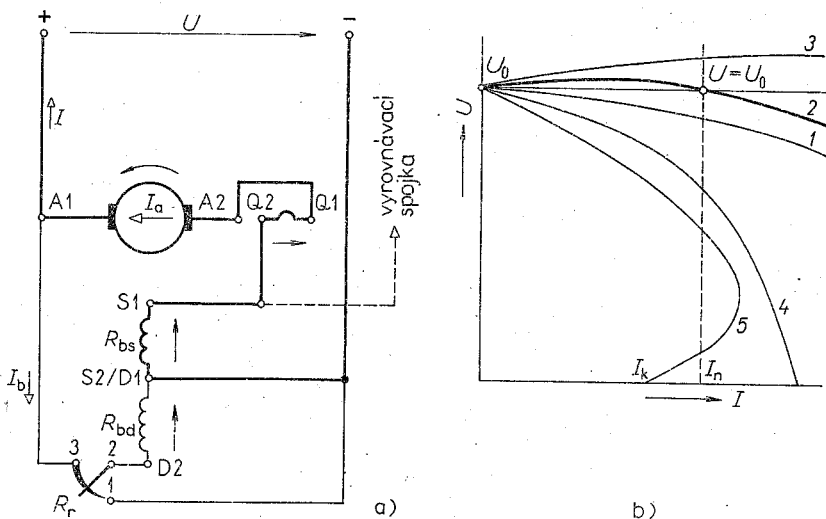
Kompaundní dynamo je stroj se sdruženým vinutím. Na pólech je umístěno derivační i sériové vinutí. Obě vinutí jsou obvykle zapojena tak, že jejich *magnetické toky se sčítají* (obr. 217a). V obvodu derivačního vinutí je zapojen derivační regulátor pro řízení napětí.

Dynama se kompaundují proto, abychom vhodně upravili jejich zatěžovací charakteristiku (obr. 217b).

1 – *Normální charakteristika* derivačního dynama, napětí se zatížením mírně klesá.

2 – *Kompaundní dynamo*; obě budící vinutí jsou zapojena tak, že se jejich účinky sčítají. Při vzrůstajícím zatížení kryje sériové vinutí svým vlivem úbytky napětí. Vhodným poměrem počtu závitů můžeme dosáhnout toho, že svorkové napětí se při jmenovitém zatížení rovná napětí naprázdno.

3 – *Překompaundované dynamo* má větší počet sériových závitů než je třeba k vykompenzování úbytků napětí vznikajících ve stroji, takže napětí s rostoucím zatížením se zvyšuje, a kryje tak úbytky napětí ve vnějším obvodu, a na svorkách spotřebiče se tak udržuje stále napětí.



Obr. 217. Kompaundní dynamo
a) schéma, b) charakteristiky

4 – Protikompaundní dynamo má sériové buzení zapojené proti derivačnímu, takže jeho působením se stroj při rostoucím zatížení odbuzuje a jeho napětí rychle klesá. Zkratový proud je jen o málo větší než jmenovitý proud.

5 – Velmi kompaundované dynamo má tak velké protikompaundní sériové vinutí, že svorkové napětí klesá se zatížením velmi prudce a zkratový proud může být i menší než jmenovitý. Takové dynamo se používá pro napájení obloukovek a pro svařování.

5.9. STEJNOSMĚRNÉ MOTORY

5.9.1. Tažná síla a moment

Má-li vinutí kotvy 2a paralelních větví, prochází vodiči proud

$$I_v = \frac{I_a}{2a} \quad (384)$$

Na jeden vodič délky l_e , který se nachází v homogenním magnetickém poli o indukci B_δ , působí síla

$$B_1 = B_\delta l_e I_v \quad (385)$$

Na kotvě je celkem N závitů a $2N$ vodičů a z nich jen $\alpha 2N$ je současně v magnetickém poli, takže celková síla působící na obvod kotvy je

$$F = F_1 \alpha 2N = B_\delta \frac{I_a}{2a} l_c \alpha 2N$$

a po úpravě

$$F = B_\delta I_a l_c \alpha \frac{N}{a} \quad [\text{N}; \text{T}, \text{A}, \text{m}] \quad (386)$$

Točivý moment vznikající od této síly je

$$M = F \frac{d}{2} = F \frac{2pt_p}{2\pi} = B_\delta I_a l_c \alpha \frac{N}{a} \cdot \frac{2pt_p}{2\pi} \quad (387)$$

neboť obvod stroje

$$\pi d = 2pt_p$$

a z toho

$$d = \frac{2pt_p}{\pi}$$

Do rovnice (387) můžeme dosadit za magnetický tok

$$\Phi = B_\delta l_c \alpha t_p$$

takže

$$M = \Phi I_a \frac{N}{a} \cdot \frac{2p}{2\pi}$$

a po úpravě

$$M = \frac{p}{\pi} \Phi I_a \frac{N}{a} = C_2 \Phi I_a \quad [\text{Nm}; \text{Wb}, \text{A}] \quad (388)$$

kde

$$C_2 = \frac{pN}{\pi a} \quad (389)$$

Je vidět, že moment je úměrný součinu magnetického toku a proudu v kotvě. Momentu odpovídá výkon

$$P = \omega M = \frac{2\pi n}{60} M \quad [\text{W}; \text{min}^{-1}, \text{N m}] \quad (390)$$

Poznámka. Moment podle rovnice (389) představuje zároveň i moment, jímž je třeba otáčet kotvou dynamu, aby jí mohl procházet proud I_a . Tento moment musí být tím větší, čím větší proud se z dynamy odebírá.

5.9.2. Otáčky motoru

V otáčející se kotvě motoru se indukují stejně jako v dynamu napětí U_i , dané rovnicí (372).

Ke svorkám motoru se přivádí napětí U . Jeho část se spotřebuje na krytí úbytků napětí v obvodu kotvy a zbytek je kompenzován indukovaným napětím

$$U = U_i + I_a(R_a + R_p + R_k) \quad (391)$$

kde R_a je odpor kotvy,

R_p odpor pomocného (komutačního) vinutí,

R_k odpor kompenzačního vinutí.

Závislost otáček motoru vychází z rovnic (372) a (391)

$$n = \frac{U_i}{C_1 \Phi} = \frac{U - I_a(R_a + R_p + R_k)}{C_1 \Phi} \quad (392)$$

nebo přibližně

$$n = \frac{U}{C_1 \Phi} \quad (393)$$

Otáčky motoru jsou přímo závislé na napětí a nepřímo závislé na magnetickém toku.

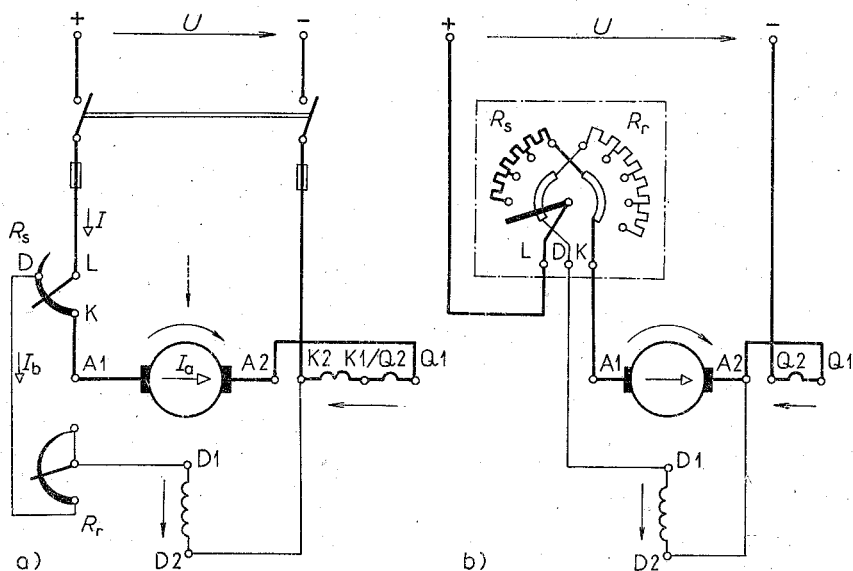
Pokud nejde o speciální regulační motory napájené z regulovatelného zdroje, je napětí stálé a otáčky lze řídit změnou magnetického toku stejně, jako se v dynamu regulovalo napětí.

Z rovnice (393) je zřejmé, že otáčky motoru se se zmenšováním magnetického toku zvětšují.

Náhlým odbuzením motoru mohou tedy otáčky nebezpečně vzrůst na velikost úměrnou remanentnímu toku a motor se může odstředivou silou mechanicky poškodit. Proto nesmějí být v budícím obvodu pojistky a všechny svorky a spoje musí být v tomto obvodu pečlivě provedeny a za provozu se musí pravidelně kontrolovat.

5.9.3. Derivační motor

Úplné schéma derivačního motoru je na obr. 218. Kotva s pomocným popř. i s kompenzačním vinutím je na síť připojena přes spouštěcí odpor R_s , derivační budící vinutí je k síti připojeno paralelně a v jeho obvodu je derivační reostat R_r .



Obr. 218. Derivační motor

a) se spouštěčem a derivačním reostatem, b) regulační spouštěč derivačního motoru

Úlohou *spouštěče* je omezit proudový náraz při spouštění, který by, byl vzhledem k nepatrnému odporu obvodu kotvy značný

$$I_k = \frac{U}{R_a + R_p + R_k} \quad (394)$$

Maximálně přípustný proudový náraz při spouštění motoru je $I_m = 2,5I_n$ (ČSN 34 1350).

Proud ze sítě se rozděluje do kotvy a do budícího vinutí

$$I = I_a + I_b \quad (395)$$

kde zatěžovací proud odpovídá výkonu

$$I = \frac{P \cdot 10^3}{U\eta} \quad [A; \text{kW}, V] \quad (396)$$

Abý motor byl po připojení k síti plně nabuzen a rozbíhal se s maximálním momentem při nejmenších otáčkách, musí být budicí vinutí připojeno na plné napětí dřív nebo současně s kotvou. Budicí vinutí tedy musí být připojeno před spouštěč.

Základní otáčky derivačního motoru, které odpovídají plnému napětí a magnetickému toku, můžeme zvětšit odbuzováním pomocí derivačního reostatu R_r . Ten je v potenciometrickém zapojení, aby nemohlo dojít k rozpojení budicího obvodu.

U normálního derivačního motoru lze řídit otáčky v rozsahu 1 : 3. Motory bez požadovaného řízení nemají derivační reostat. Přesnou velikost otáček můžeme dodatečně nastavit vhodným trvalým odporem v obvodu buzení.

Řízení otáček změnou budicího proudu je hospodárné, neboť budicí proud je poměrně malý a ztráty v derivačním reostatu jsou nepatrné.

Derivační reostat může být spojen v jeden celek se spouštěcím odporem. Vznikne tak *regulační spouštěč* (obr. 218b).

Derivační motor můžeme řídit i změnou napětí na kotvě pomocí spouštěče, dimenzovaného na trvalé zatížení

Závislost otáček na proudu v kotvě vychází ze vztahu

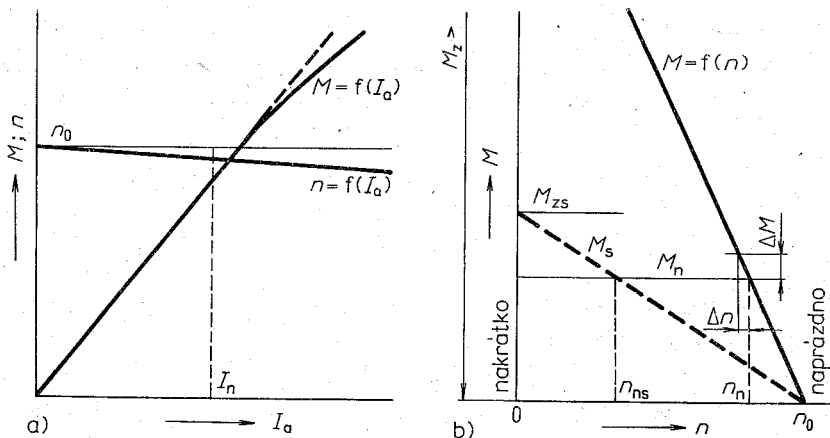
$$n = \frac{U_i}{C_1 \Phi} = \frac{U - I_a(R_a + R_p + R_k)}{C_1 \Phi} \quad (397)$$

Se zvětšujícím se zatížením otáčky mírně klesají působením malého úbytku napětí v obvodu kotvy.

Derivační motor má tvrdé otáčky (obr. 219a).

Závislost momentu na proudu je dána rovnicí (388). Pro stálý magnetický tok je to přímková závislost. *Se zvětšujícím se zatížením se moment rovnoměrně zvětšuje.*

Jen pro větší zatížení se uplatní pokles magnetického toku způsobeného reakcí kotvy a vzrůst momentu je mírnější. Rozborem základních vztahů lze dokázat, že *momentová charakteristika* udávající závislost momentu na otáčkách je dána přímkou (obr. 217b).



Obr. 219. Charakteristiky derivačního motoru
a) závislost otáček a momentu na zatížení, b) momentová charakteristika

Záběrný moment, odpovídající plnému proudu nakrátko je podle rovnice (388)

$$M_z = C_2 \Phi I_k \quad (398)$$

Záběrný moment je velký, neboť zkratový proud I_k , omezený jen odporem obvodu kotvy, je značný.

V praxi nemůžeme tento záběrný moment využít, neboť jemu odpovídající proud motor tepelně nevydrží. Použitím spouštěcího odporu se zmenší na velikost (obr. 219b)

$$M_{zs} = C_2 \Phi \frac{U}{R_s + R_a + R_p + R_k} \quad (399)$$

Reverzovat motor nemůžeme pouhou záměnou přívodů, neboť se přitom současně změni smysl proudu v kotvě i budicím vinutí.

Jen motorky s trvalými magnety se reverzují přepólováním přívodů (hračky).

Reverzovat lze

1. změnou proudu v budicím vinutí,
2. změnou proudu v kotvě.

Proud v budicím vinutí se mění jen při jednorázovém přepínání. Není možné tímto způsobem reverzovat tehdy, jestliže má být motor

brzděn generátorickým chodem, neboť by ztratil zbytkový magnetický tok a nemohl by se již samovolně nabudit.

Stejně není možné přepólovat reverzační motory, u nichž je třeba měnit otáčky rychle a často, neboť

1. přemagnetováním se ztrácí energie potřebná ke zrušení a opětovnému nabuzení magnetického pole,

2. rychlá změna proudu v budičím vinutí vyvolává nebezpečné přepětí,

3. přemagnetování trvá vlivem remanence a indukčnosti jistou dobu, takže reverzovaný motor by se po přepólování mohl rozbíhat s malým magnetickým tokem, malým momentem a popř. i s většími otáčkami.

Obvykle reverzujeme změnou proudu v kotvě (obr. 220), přičemž směr proudu v budičím vinutí zůstane nezměněn.

Brzdění motoru po jeho vypnutí je potřebné

1. pohání-li motor velké setrvačné hmoty a samočinné brzdění by trvalo dlouhý čas (trpí přitom ložiska),

2. jde-li o reverzační motor, který musí v rychlých cyklech měnit směr točení, např. pohon hoblovek,

3. působí-li na vypnutý motor cizí točivý moment, např. tíha zavěšeného břemene, pohyb vozidla apod.

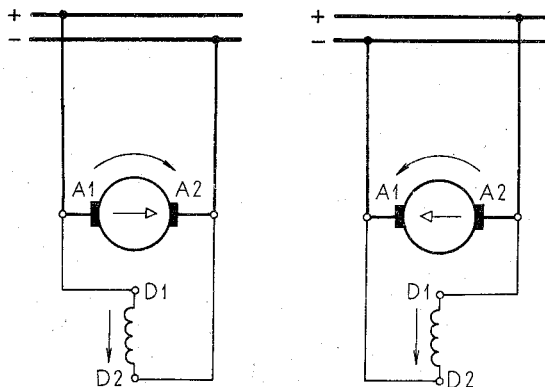
Brzdit můžeme

1. mechanicky – nevýhodné, málo používané,

2. elektricky: a) brzděním do odporů,

b) rekuperací,

c) protiproudem.



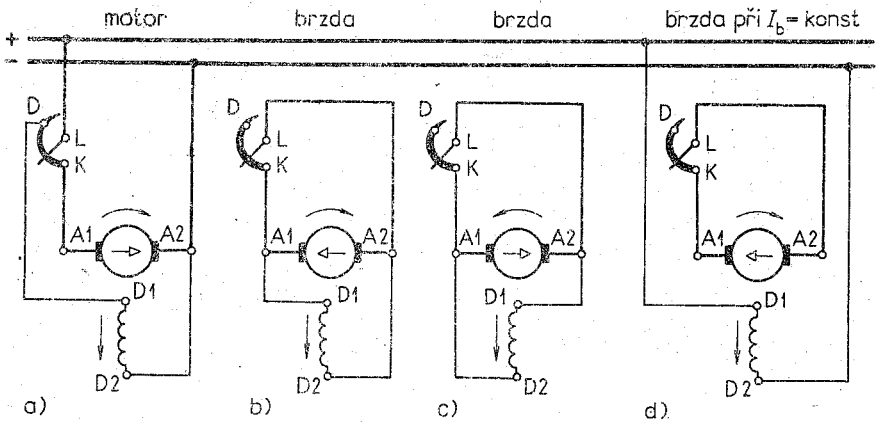
Obr. 220. Reverzace derivačního motoru

a) *Do odporů* se brzdí tak, že se motor odpojí od sítě a připojí k odporům, v nichž se kinetická energie brzděných hmot mění přes elektrickou energii v teplo. Je to tzv. *dynamické brzdění*. Jako brzdící odpory můžeme použít stupně spouštěcího odporu, který musí být přiměřeně dimenzován.

Brzdný moment je úměrný magnetickému toku a proudu

$$M_{\text{brzd}} = C_2 \Phi I_a \quad (400)$$

Během brzdění otáčky klesají, tím klesá i napětí na svorkách brzděného motoru i brzdný proud procházející brzdícím odporem. Abychom dosáhli stálejšího brzdícího momentu, je třeba během brzdění odpor postupně zmenšovat. K tomu jsou určeny a vyhovují stupně spouštěče.



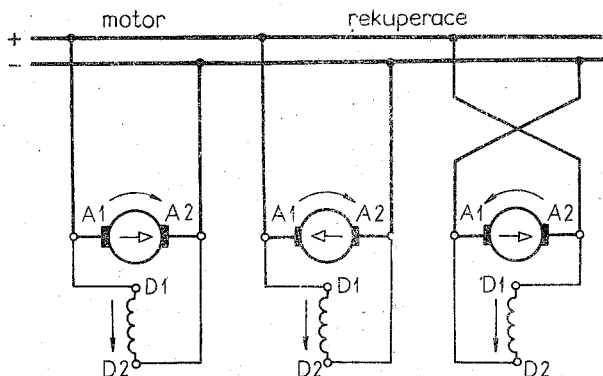
Obr. 221. Brzdění derivačního motoru

a) motorový chod, b) brzdění při původním směru otáčení, c) brzdění při opačném směru otáčení, d) brzdění při stálém budícím proudu

Na obr. 221 je příklad zapojení pro brzdění odporníky pro různé směry točení.

Při brzdění spouštěného břemene (obr. 221c) je třeba budící vinutí přepojit, aby se v nich zachoval stejný směr proudu.

Brzdný moment lze zvětšit i tím, že během brzdění se budící vinutí od kotvy odpojí a připojí přímo k síti (obr. 221d). Budící proud se potom během brzdění nezměňuje, takže $M_{\text{brzd}} \sim I_a$.



Obr. 222. Brzdění derivačního motoru rekuperací

b) *Rekuperace* se nazývá vracení energie do sítě během generátorického chodu brzděného motoru.

Začne-li se motor připojený k síti působením vnějšího momentu otáčet většími otáčkami než jsou základní otáčky nastavené buzením, bude napětí indukované v kotvě vyšší, ale bude mít původní směr. Bude-li toto napětí vyšší než napětí na svorkách motoru, změní se smysl proudu v kotvě a motor bude pracovat jako dynamo. Přitom bude dodávat do sítě energii a tím bude také brzděn.

Zvýšení indukovaného napětí při klesajících otáčkách lze způsobit přibuzením motoru derivačním reostatem.

Z obr. 222 je vidět, že při rekuperaci pro původní směr točení není třeba motor přepínat. Smysl proudu v kotvě se sice změní, ale polarita svorek kotvy zůstane stejná, takže budícím vinutím prochází proud původního směru.

Jen při brzdění spojeném se změnou směru točení (např. klesající břemeno) je třeba kotvu i budící vinutí přepojit.

Rekuperace se používá k brzdění trakčních motorů na dlouhých horských tratích (lze jí ušetřit až 25 % energie), u velkých hoblovek, výtazích apod. Není vhodná pro rychlé tratě s častými zastávkami, např. v městské dopravě.

c) *Brzdění protiproudem* spočívá v tom, že motor se rychle odpojí od sítě, přepne na opačný směr točení a znovu připojí k síti. Přitom se setrvačností otáčí původním směrem, ale točivý moment působí opačně,

takže se velmi rychle zabrzdí. V okamžiku zastavení se musí samočinně odpojit od sítě, aby se neroztočil opačným směrem.

Použití derivačního motoru vyplývá ze základních vlastností motoru

1. stálé otáčky i při proměnném zatížení; proto ho můžeme použít i tam, kde může za provozu dojít k odlehčení,

2. možnost hospodárného brzdění rekuperací,

3. možnost hospodárného a plynulého řízení otáček,

4. poměrně malý skutečný záběrný moment, omezený použitím spouštěče a velkým úbytkem napětí v síti, který je způsoben záběrným proudem (vhodný víc pro rozběh naprázdno),

5. nerovnoměrné zatěžování sítě při proměnlivém zatížení, zaviněné stálostí otáček. Všechny mechanické nárazy se přenášejí do sítě. Proto nevyhovuje pro použití v elektrické trakci, neboť při jízdě do kopce by velmi zatěžoval trolejovou síť.

Derivační motor se používá pro pohon obráběcích strojů, transmisí, válcovacích stolů, lokomotivních točen apod. Nevyhovuje pro pohony se setrvačником, neboť při nárazech nezmenší své otáčky a sám snáší celé přetížení, přičemž setrvačnik se jen naprázdno otáčí.

5.9.4. Sériový motor

Všechna vinutí sériového motoru jsou zapojena do série s kotvou (obr. 223a) a všemi prochází společný proud $I = I_a = I_b$.

K síti je připojen motor přes spouštěč, jen malé motorky můžeme spouštět přímým připojením k síti. Reverzuje se podle stejných zásad jako derivační motor (obr. 223b).

Závislost otáček na zatížení vychází z magnetizační charakteristiky. Magnetický tok sériového motoru se budí zatěžovacím proudem. Pokud stroj pracuje v přímkové části charakteristiky, můžeme ho považovat za přímo úměrný proud

$$\Phi = C_3 I \quad (401)$$

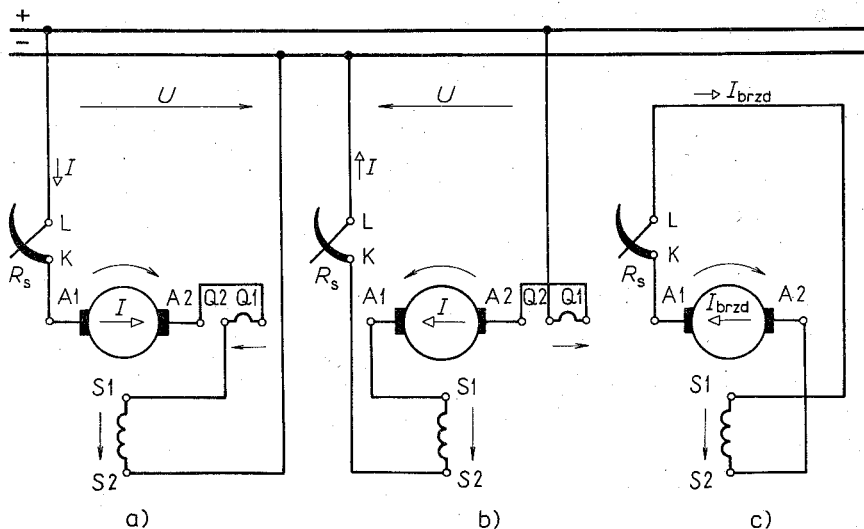
takže závislost otáček na magnetickém toku ze vztahu (397) můžeme upravit na tvar

$$n = \frac{U_i}{C_1 \Phi} = \frac{U - I(R_a + R_{bs} + R_p + R_k)}{C_1 C_3 I} \quad (402)$$

Při stálém napětí a při zanedbání úbytků napětí platí přibližně

$$n \doteq \frac{U}{C_1 C_3 I} = \frac{U}{C_1 C_3} \cdot \frac{1}{I} \quad (403)$$

Závislost je hyperbolická (obr. 224a), jen při větších proudech se vlivem přesycení železa od hyperboly odkloní (určitému proudu odpovídá menší magnetický tok, tedy větší otáčky).



Obr. 223. Sériový motor
a) základní schéma, b) reverzace, c) brzdění

Z nakreslené charakteristiky je vidět, že při teoretickém chodu naprázdno ($I = 0$) by otáčky narůstaly bez omezení, zanedbáme-li hmotnost (a tedy moment setrvačnosti) rotoru. Ve skutečnosti se nakonec ustálí při rovnosti příkonu naprázdno a ztrát, zejména mechanických, ale i tak jsou tak velké, že je kotva nemůže z mechanických důvodů vydržet.

Proto se nesmí sériový motor spouštět nezátížený a za provozu musí být zajištěn, aby se nemohl odlehčit. Jestliže odlehčení nelze vyloučit (např. spadnutí břemene), musí být motor proti proběhnutí chráněn odstředivým vypínačem nebo vhodným relé.

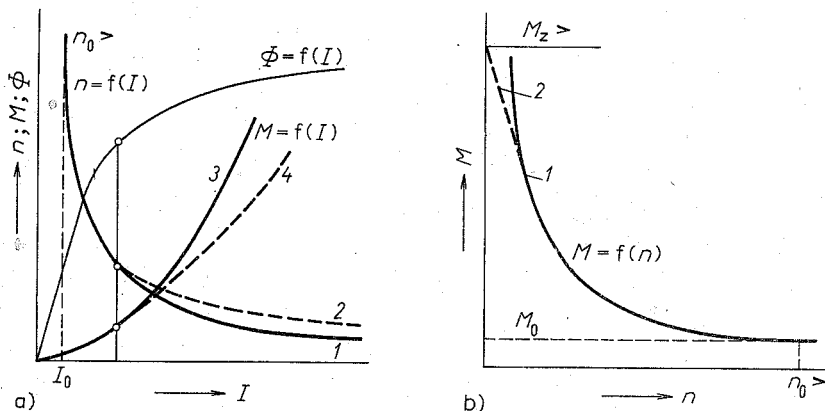
Závislost momentu na zatížení vychází z rovnice (388)

$$M = C_2 \Phi I$$

Dosadíme-li pro přímkovou část charakteristiky rovnici (401), dostaneme

$$M = C_2 C_3 I^2 \quad (404)$$

Je to parabola (obr. 224a, křivka 3). Moment sériového motoru roste s druhou mocninou proudu.



Obr. 224. Charakteristiky sériového motoru

a) závislost otáček a momentu na zatížení

1 – hyperbolický průběh otáček, 2 – odklon vlivem přesycení železa, 3 – parabolický průběh momentu, 4 – lineární odklon vlivem přesycení železa,

b) momentová charakteristika

1 – teoretický průběh, 2 – skutečný průběh

Za ohybem charakteristiky se magnetický tok s proudem jen málo zvětšuje a moment roste pomaleji, téměř přímkově podle čáry 4 na obr. 224a. Přibližně platí

$$M = C_4 I \quad (405)$$

Záběrný moment vychází značně velký, neboť odpovídá velkému záběrnému proudu

$$I_k = \frac{U}{R_a + R_{bs} + R_p + R_k} \quad (406)$$

Plný záběrný moment by sériový motor nemusel vydržet. Proto se sériovým spouštěčem zmenšuje na hodnotu $M_{zs} = (4 \text{ až } 5) M_n$, která i tak je značná.

Momentovou charakteristiku odvodíme ze vztahů

$$M = C_2 C_3 I^2$$

$$U_1 = C_1 \Phi n = C_1 C_3 I n = U - I(R_a + R_{bs} + R_p + R_k)$$

z nichž vychází

$$I = \frac{U}{C_1 C_3 n + (R_a + R_{bs} + R_p + R_k)}$$

a po dosazení do výrazu pro M dostaneme

$$M = C_2 C_3 \left(\frac{U}{C_1 C_3 n + (R_a + R_{bs} + R_p + R_k)} \right)^2 \quad (407)$$

Tato závislost je zobrazena hyperbolicou čarou I na obr. 224b. Při menších otáčkách (velký proud) přechází v přímku 2.

Z uvedených charakteristik vyplývá, že sériový motor je velmi měkký motor. Své otáčky plynule přizpůsobuje danému zatížení. *Proto je nejideálnějším trakčním motorem.* Rozbíhá se pomalu, s velkým záběrným momentem a během rozběhu své otáčky stále zvětšuje.

Výhodný je i pro pohon jeřábové kočky a mostu. Na zdvihání ho lze použít jen tehdy, jestliže se k němu přidá ochrana proti proběhnutí.

Velkou předností sériového motoru je, že i při proměnném zatížení (jaké je obvyklé např. v trakci a u jeřábů) zatěžuje síť rovnoměrně stálým výkonem.

Není vhodný pro pohon obráběcích strojů (častý chod naprázdno) a pro řemenové převody (spadnutí řemene).

Sériový motor lze řídit

1. změnou napětí na kotvě,
2. změnou magnetického toku.

Řízení *změnou napětí na kotvě* můžeme uskutečnit spouštěcím odporem. Řízení je jednoduché, ale nevhodné. Používá se jen v malém regulačním rozsahu.

Zejména u dráhových motorů je výhodné hrubé řízení přepínáním několika motorů do série a paralelně.

Krátkodobého zmenšení otáček můžeme dosáhnout paralelním připojením vhodného odporu ke kotvě.

Základní *otáčky* (odpovídající určitému zatížení) *se zvětší* odbuzováním.

Odbuzuje se

1. paralelním řazením (šuntováním) stálého odporu,
2. paralelním řazením proměnného odporu,
3. přepínáním počtu budicích závitů,
4. zkratováním budicích závitů.

Sériový motor se nejčastěji *brzdí „do odporů“*. Abychom nezrušili remanentní magnetismus, musí se při brzdění budicí vinutí magnetů přepólovat (obr. 223c). Rekuperovat jej nelze, neboť napětí brzdného motoru v generátorickém chodu je velmi proměnlivé.

5.9.5. Kompaundní motor

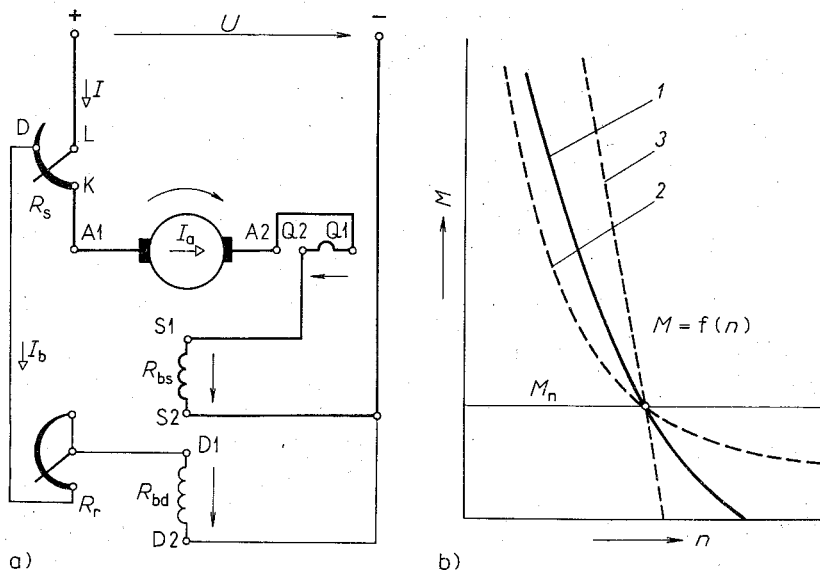
Budicí vinutí má *sériové vinutí*, zapojené do série s kotvou, pomocnými vinutími a spouštěcím odporem, a *derivační vinutí*, připojené k síti přes případný derivační regulátor (obr. 225a).

Zapojení musí být takové, aby magnetické toky obou vinutí měly stejný smysl. Tento smysl se nesmí změnit ani při reverzaci, kterou tedy můžeme uskutečnit jen přepínáním smyslu proudu v kotvě.

Vlastnosti kompaundního motoru jsou dány poměrem závitů obou vinutí.

Derivační motor se kompaunduje sériovým vinutím tehdy, jestliže se od něho žádá měkčí chod a větší záběrný moment, např. u pohonů se setrvačnickem, u válcovacích stolic, lisech apod. (Při nárazech vlivem sériového buzení klesají otáčky a moment stoupá.) Kompaundovaný derivační motor je stabilnější při nárazech, kdy by se působením reakce kotvy mohlo pole samotného derivačního vinutí zeslabit tak, že by se motor zastavil.

Sériové motory se kompaundují tehdy, jestliže musíme vyloučit nebezpečí jejich proběhnutí na velké otáčky při náhlém odlehčení. Maximální dosažitelné otáčky jsou dány stálým magnetickým tokem derivačního vinutí.



Obr. 225. Kompaundní motor
 a) schéma, b) momentová charakteristika
 1 – kompaundní motor, 2 – sériový motor, 3 – derivační motor

Kompaundují se i některé trakční motory, abychom jimi mohli rekuperovat.

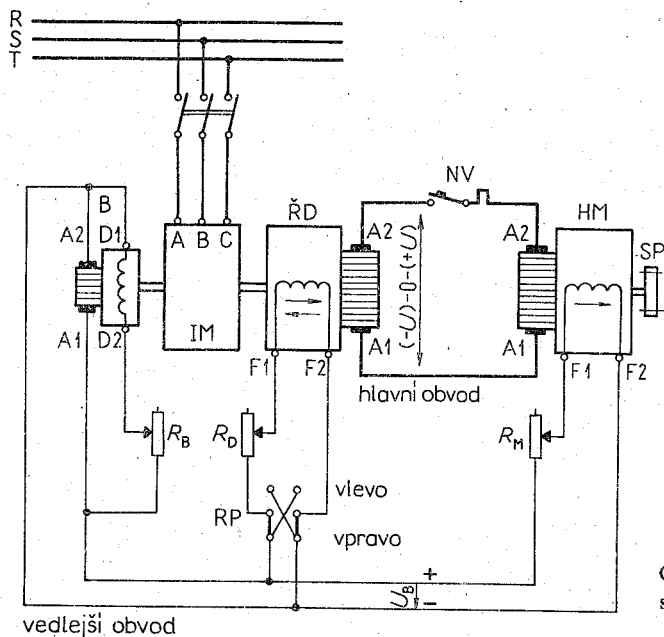
Momentová charakteristika se podle poměru obou vinutí pohybuje mezi charakteristikou derivačního a sériového motoru (obr. 225b).

5.9.6. Motor s cizím buzením

Budicí vinutí má napájení z cizího říditelného zdroje, takže jeho otáčky můžeme v širokém rozsahu řídit a vůbec nezávisejí na zatížení.

Příkladem použití je tzv. *Leonardova skupina* (Harry Ward Leonard – 1891).

Používá se tam, kde žádáme plynulou a hospodárnou regulaci v širokém rozmezí (až 1 : 10) nebo kde se požaduje dodržování nastavených otáček i při velmi kolísajícím zatížení. Schéma klasické Leonardovy skupiny je na obr. 226.



Obr. 226. Leonardova skupina

Hlavní motor HM je přímo spojen se svorkami řídicího dynama ŘD, které je poháněno indukčním motorem IM. Hlavní motor i řídicí dynamo mají cizí buzení z derivačního budiče B, který je obvykle na společné ose s řídicím dynamem. Jen u pohonů s několika Leonardovými skupinami bývá jeden samostatný budič se svým vlastním pohonným motorem.

Indukční pohonný motor můžeme nahradit jakýmkoli jiným pohonným strojem.

Budicí napětí U_B se nastavuje regulátorem R_B , napětí řídicího dynama reostatem R_D a budicí proud hlavního motoru reostatem R_M .

Skupina se spouští při odbuzeném řídicím dynamu. Po spuštění indukčního motoru se nabudí napřed budič svým reostatem. Místo reostatu R_B můžeme použít i stálý předřadník, jímž se budicí napětí pro určité otáčky trvale nastaví.

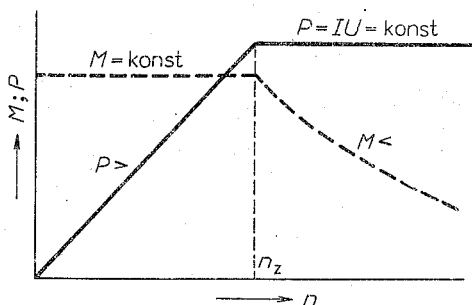
Hlavní motor má přitom reostat nastaven na maximální budicí proud, je tedy vyřazen.

Řídicí dynamo se plynule nabuzuje reostatem R_D a jak stoupá jeho napětí, tak se plynule a bez zvláštního spouštěče rozbíhá i hlavní motor.

Změnou buzení řídicího dynama můžeme řídit otáčky motoru od nuly až do určité velikosti n_z (obr. 227), která odpovídá plnému napětí a plnému magnetickému toku motoru.

Pásmo 0 až n_z představuje regulaci za stálého momentu. Motor je obvykle zatížen stálým momentem daným hnaným zařízením, proto i při proměnlivém napětí dynama odebírá stále stejný proud podle vztahu $M = C_2 \Phi I = \text{konst.}$

Při stálém proudu a proměnlivém napětí se mění výkon motoru $P = UI$ rovnoměrně s otáčkami, které jsou přímo úměrné napětí.



Obr. 227. Regulace Leonardovy skupiny

Dále se mohou otáčky zvětšovat nad n_z odbuzováním motoru až po otáčky dané mechanickou pevností a komutačními poměry.

Otáčky se zvětšují za stálého výkonu a proměnlivého momentu.

Velkou předností Leonardovy skupiny je, že všechny regulační pochody probíhají ve vedlejších obvodech, při malém proudu, takže i při velkých jednotkách jsou regulační přístroje poměrně malé, jednoduché, a proto spolehlivé. Tato spolehlivost je rozhodující pro velké a často spouštěné, reverzované a zastavované jednotky.

V hlavním obvodu mezi dynamem a motorem (v tzv. smyčce) nemusí být žádné přístroje. Dává se do něho jen ochranný nadproudový vypínač NV, který chrání stroje před dlouhodobým přetížením.

Protože celá skupina spotřebuje až tři stroje stejného výkonu, je nákladná a pracuje s malou účinností (η_1 , η_2 , η_3). Proto je vhodná jen pro větší výkony, u nichž jednotlivé účinnosti jsou dost velké.

S ohledem na vlastnosti se Leonardova skupina používá u velkých regulačních pohonů v těžkých provozech, např. pro válcovací stolice, důlní těžní stroje, výtahy pro vysoké pece, rychlovýtahy ve výškových budovách, papírenské stroje, lodní zdvihadla, kotvové navijáky, k nastavení elektrod v elektrických tavicích pecích, jeřáby, rypadla, sklápěči

mosty apod. V kombinaci s elektronickým regulátorem se může použít i tam, kde žádáme stálé otáčky. Je zvlášť výhodná pro pohon velkých obráběcích strojů, zejména mamutích hoblovek. Pro pohon obráběcích strojů je výhodná tak, že se používá i při malých výkonech, i pod 1 kW.

Indukční motor, řídicí dynamo a budič jsou často upraveny v jednom celku jako monoblok.

Reverzace se uskutečňuje přepólováním řídicího dynama, např. reverzačním přepínačem RP. U dynama s cizím buzením je přepólování možné, neboť remanentního pole není třeba.

Brzdit je výhodné rekuperací. Ta je možná při použití indukčního motoru nebo řízeného usměrňovače. Při použití primárního pohonného motoru se nedá použít.

Poznámka. Tak zvaná Ilnerova skupina je v podstatě Leonardova skupina, doplněná velkým setrvačником, jehož úlohou je překonávat nárazy zatížení. Dnes, při poměrně tvrdých sítích, není už aktuální.

5.9.7. Řízení tyristory

Řízení tyristory umožňuje úplné hospodárné spouštění motoru, plynulé řízení otáček, popř. i brzdění motoru.

Výhoda spočívá v tom, že řízením se žádná energie neztrácí ve spouštěcích a regulačních odporech. Proto je řízení tyristory zvlášť výhodné pro akumulátorové vozíky, u nichž se úspora energie projeví zvětšením dojezdu. Tato výhoda vyváží dosud ještě dost vysokou cenu tyristorové regulace.

Regulace tyristory se používá i na elektrických lokomotivách a zavádí se v městské dopravě.

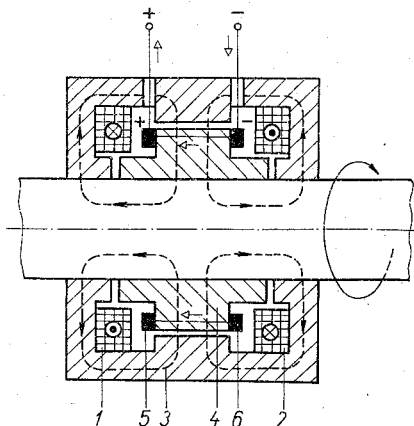
Vhodnou kombinací tyristorových součástek může stejnosměrný motor mít vlastnosti Leonardovy skupiny při podstatně nižší ceně a větší hospodárnosti. Např. firma Westinghouse vyrábí regulační motory o výkonu 2 až 55 kW s regulačním rozsahem až 1 : 40, popř. při použití předzesilovače až 200 : 1.

Způsoby vlastní regulace mohou být různé. Střední hodnota přiváděného svorkového napětí se může měnit např. tak, že pomocí tyristoru se přiváděný proud přerušuje v proměnlivém rytmu. Budicí proud můžeme zase měnit tak, že do série s budičím vinutím zařadíme určitý předřadník, který se tyristorem v různých intervalech zkratuje.

5.10. UNIPOLÁRNÍ STEJNOSMĚRNÉ STROJE

Unipolární (homopolární) dynama pracují na základě Faradayova principu. Princip nejjednoduššího unipolárního dynama je vyznačen na obr. 228.

Magnetický tok dynama budí dvě sousedé stojící cívky 1, 2, napájené z pomocného budicího zdroje. Magnetické pole se uzavírá masívním tělesem kostry 3 tak, že po celém jejím vnitřním obvodu z něho vystupuje, čímž vzniká trvale např. severní pól.



Obr. 228. Unipolární dynamo
1, 2 – budicí cívky, 3 – statorové těleso,
4 – rotorové těleso, 5, 6 – kartáče

V tomto stálém magnetickém poli se otáčí hladký válec z magnetického materiálu 4 a jeho povrchové vrstvy (elementární podélná vlákna) protínají indukční čáry stále stejným směrem. Tím se v nich indukují napětí vždy stejného smyslu, takže jeden kraj válce je trvale záporný. Dynamo tedy nepotřebuje komutátor. Proud můžeme odebrat přímo s povrchu válce pomocí kartáčů 5, 6.

Indukované napětí závisí na otáčkách, činné délce indukčního válce a na magnetické indukci ve vzduchové mezeře.

Magnetická indukce ve vzduchové mezeře je omezena a bývá maximálně $B = 2 \text{ T}$. Otáčky jsou vázány poměry při odběru proudu kluznými kartáči, a napětí jednoduchého stroje s jednou kotvou je tedy malé (desítky voltů).

S ohledem na poměrně nízké indukované napětí přichází unipolární dynamo v úvahu tam, kde žádáme velké proudy. Odběr velkých proudů způsobuje však problémy. Sběrací mědnografitové kartáče mají velký

úbytek napětí na přechodovém odporu, což vede k jejich místnímu přehřívání, takže je jimi dovolené proudové zatížení omezeno. Řešení se hledá v použití *kapalinových kartáčů*.

Výhodou *unipolárních strojů* je jejich konstrukční a technologická jednoduchost, jednoduché budicí vinutí, velmi dobrá účinnost a velká přetížitelnost. Dají se jednoduše řídit změnou budicího proudu a reverzovat změnou směru budicího proudu.

Unipolární dynamo se hodí pro napájení

1. elektromagnetických čerpadel na tekuté kovy,
2. elektrolyzy,
3. magnetů pro urychlování nukleárních částic,
4. budicích cívek velkých elektromagnetů v laboratořích, u nichž se dosahuje magnetické indukce až 30 T.

5.11. KONSTRUKCE STEJNOSMĚRNÝCH STROJŮ

5.11.1. Všeobecné úvahy

V poslední době se opět začala věnovat zvýšená pozornost konstrukci stejnosměrných strojů. Vzhledem k tomu, že jde většinou o stroje s těžkým provozem (regulace, reverzace), kladou se na jejich konstrukci velké nároky. Vlastní konstrukce je kromě toho charakterizována i tím, že sériovost výroby je značně menší než např. u indukčních strojů, a proto v zájmu zlepšení technologičnosti se i při menších sériích využívá některých konstrukčních částí z indukčních strojů.

Mezní výkony mají dnes motory pro válcovací stolice o výkonu 8 až 10 MW při poměrně malých otáčkách (do 100 min^{-1}) a při napětí do 600 V, nejvýše 900 V.

Podle provedení, krytí a chlazení se stejnosměrné stroje označují stejně jako indukční (viz čl. 1.2 a 3.21).

5.11.2. Konstrukční detaily

Rotorový svazek se otáčí v magnetickém poli, a proto musí být stejně jako u indukčních strojů zhotoven z izolovaných dynamových plechů. Podobně i jeho výroba, stáhnutí a upevnění na hřídeli, popř. na rotorové hvězdě je stejně jako u indukčních strojů.

Svazky o průměru větším než 1 m se skládají ze segmentů upevněných na klínových lištách. U sériové výroby je snaha vyrábět co největší průměry vcelku jedním řezem.

Pro zmenšení ztrát vířivými proudy se mezi svazky tloušťky 30 až 40 mm vkládá lepenka tloušťky 0,3 až 0,5 mm.

Postranice nebo rotorové hvězdy mívají podpěry pro čela rotorového vinutí, které zejména u strojů s velkými otáčkami a u strojů s nebezpečím proběhnutí musí umožnit, aby se daly co nejlépe upevnit.

Konstrukce hřídele, ložisek a ventilátorů je stejná jako u indukčních strojů.

Rotorové vinutí se do průřezu 6 až 7 mm² zhotovuje z drátů kruhového průřezu, při větších rozměrech je z dynamových pásů a při velmi velkých proudcích z masivních tyčí. Vinutí je obvykle dvouvrstvé, jen kotvy malých strojů mívají vinutí jednovrstvé.

Vinutí se u menších strojů navijí přímo do drážek (ruční vinutí), u větších strojů se do drážek vkládají hotové cívky, vyrobené mimo stroj na dřevěných nebo kovových šablonách (šablonové vinutí).

Čela vinutí jsou proti účinkům odstředivé síly chráněna bandážemi z pocínovaného ocelového nebo bronzového drátu o průměru 0,5 až 3 mm, který se navine na izolační podložku z lesklé lepenky, leatheroidu nebo mikanitu.

Rychloběžné stroje mívají na čelech nasunuty masivní bandážovací kruhy z nemagnetické oceli.

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

Statorová kostra stejnosměrných strojů tvoří jho, jímž se uzavírá magnetický tok mezi jednotlivými póly, a proto musí být z magnetického materiálu. Protože jí prochází stálý a neproměnný magnetický tok, může být z masivního materiálu. Bývá ze šedé litiny, ocelolitiny, u větších a zejména u jednotlivě vyráběných strojů bývá svařovaná z ocelového plechu.

Trakční motory napájené pulsačním proudem odebíraným z usměrňovače umístěného přímo na lokomotivě mívají statorovou kostru z plechů, aby se zmenšily ztráty v železe.

V poslední době mívají nejen trakční motory, ale i motory pro spe-

ciální pohony (např. válcovací tratě) statorovou kostru složenou z plechů (obr. 192).

Celkový tvar kostry je řešen tak, aby umožnil upevnit hlavní a pomocné póly a osadit oba ložiskové štíty. Menší stroje mívají kostru nesouměrnou, abychom získali prostor pro umístění komutátoru i při použití stejných ložiskových štítů.

Hlavní póly, i když jimi prochází stálý magnetický tok, jsou zhotoveny z plechů tloušťky 0,5 až 1 mm, neboť tak je lze vyrobit jednoduchým prostřiháváním na lisech spolu s pólovými nástavci. Je to značně výhodnější než póly zhotovovat z ocelolitiny.

Derivační budící vinutí bývá obvykle z kruhového dynamového drátu, sériové budící vinutí se při obvyklých větších průřezech vyrábí z plochých holých pásů, navíjených naplocho nebo navysoko.

Všechny budící cívky jednoho stroje se navíjejí stejně. Různé polarity se dosáhne jejich opačným nasunutím na pól.

Pomocné póly jsou obvykle z masívní oceli, jen pro velké regulační a reverzační stroje, kde dochází k rychlým změnám proudu v kotvě i v pomocných pólech, jsou složeny z plechů.

Cívky hlavních a pomocných pólů motorů pro těžký provoz (válcovací motory, trakční apod.) bývají celé zalité v epoxidové pryskyřici.

Komutátor představuje zejména u větších strojů a při větších otáčkách konstrukčně a technologicky velmi náročnou část stejnosměrných strojů.

Dnešní komutátory jsou zhotoveny z měděných lamel, vhodně stažených a uložených na nosné části komutátoru. Mezi lamely se dává izolace z tzv. komutátorového mikanitu oboustranně broušeného, s elektrickou pevností 12 kV/mm.

Kartáče jsou výhradně uhlíkové a vyrábějí se v různých kvalitách a úpravách.

Jakost kartáčů je v daných pracovních podmínkách rozhodující. Při nevhodné jakosti se kartáče brzy opotřebují, vhodně volené kartáče mohou na stejném stroji vydržet značně dlouho.

Podle postavení na komutátoru jsou kartáče

1. *radiální* — nejčastější, delší rozměr kartáče je ve směru osy komutátoru, vyhovují pro oba směry točení,

2. *reakční* — skloněné o 60° vzhledem ke směru točení, zmenšují tření vlastního kartáče v držáku, jsou použitelné jen pro jeden směr točení,

3. *vlečné* — skloněné o 8° ve směru točení, zmenšují ztráty třením a zlepšují komutační poměry, jsou také jen pro jeden směr točení.

Pro zlepšení komutace se volí v různých úpravách i kartáče dvojité a vrstvené.

Rozměry radiálních kartáčů jsou v ČSN 35 0821.

Držáky kartáčů se vyrábějí z polotvrdého mosazného plechu nebo z lité mosazi. Pro velmi namáhané trakční stroje i z litého bronzu. Montují se tak, aby dolní okraj držáku byl maximálně 2 mm nad povrchem komutátoru. Typy držáků s jejich rozměry jsou v ČSN 35 0830 až 35 0845.

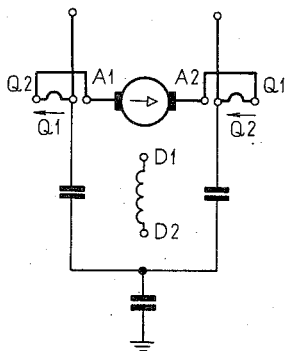
5.11.3. Příklady zhotovených stejnosměrných strojů

a) Jednotná řada stejnosměrných strojů

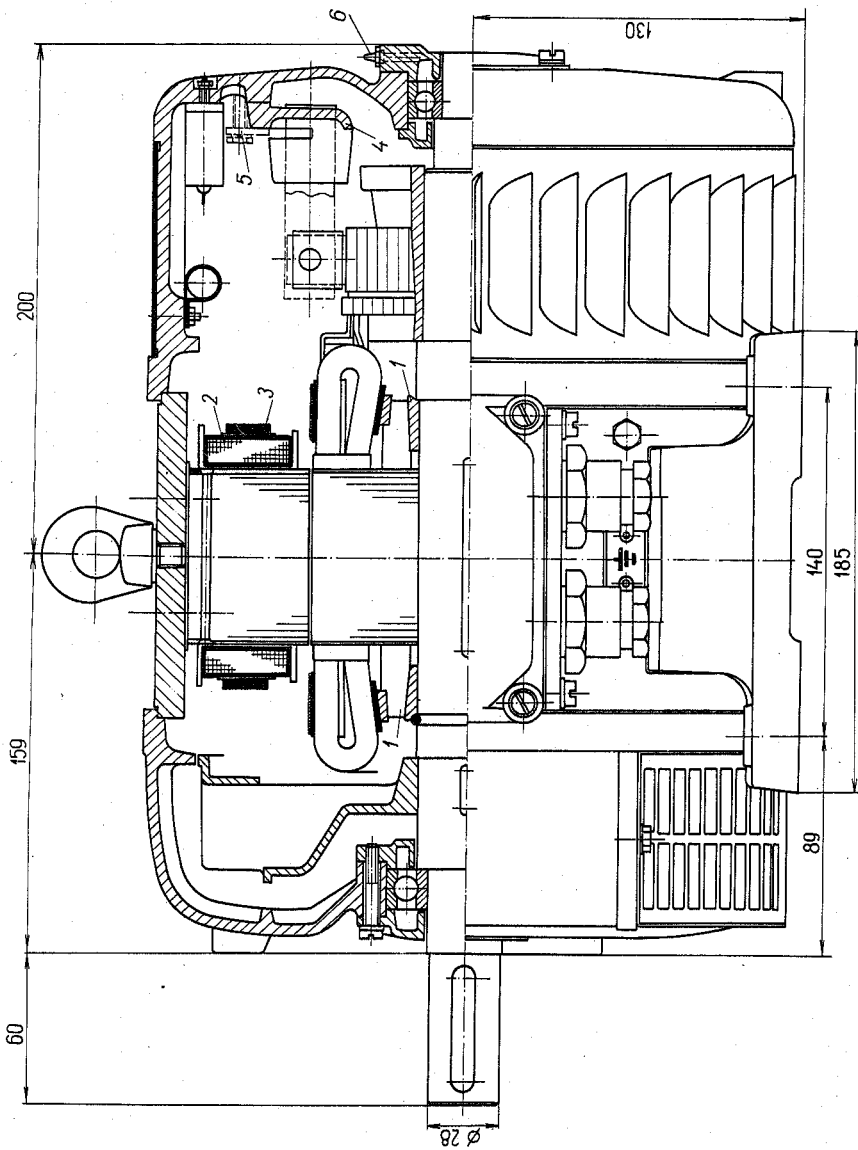
V minulých letech byl u nás ukončen vývoj unifikované řady stejnosměrných strojů. Vyrábí je MEZ Brno, n. p. (označení SM, SD o výkonech od 0,4 do 38 kW; M — motor, D — dynamo) a závod MEZ Vsetín, n. p. (označení D a M, výkon od 14 do 750 kW v různém provedení).

Ve světovém měřítku jsou tyto řady prvním řešením, při nichž se uplatnila unifikace mezi řadami stejnosměrných strojů a komutátorových motorů na střídavý proud. Unifikací se dosáhlo větší sériovosti jednotlivých dílů i při malých sériích vlastních strojů. To značně přispívá ke zhuštění výroby.

Základní budicí vinutí je derivační. Většina strojů je kompaundována pomocným sériovým vinutím pro zvětšení stability otáček nebo u dynam pro zvětšení stability napěťové charakteristiky.



Obr. 229. Zapojení odrušovacích kondenzátorů



Sériové stabilizační vinutí je třeba při reverzaci přepínat.

Hlavní budičí vinutí je z kruhového vodiče izolovaného smaltem, stabilizační a komutační vinutí je podle velikosti z kruhového nebo profilovaného vodiče, izolovaného smaltem nebo skleněnou izolací.

Kartáče jsou také unifikovány, takže pro celou řadu stačí jen málo rozměrů.

Kostra je litinová, jen u větších typů svařovaná. Ložiskové štíty jsou litinové, přední štít má snímatelné kryty, umožňující přístup ke sběracímu ústrojí. Horní kryty jsou z nerozbitného skla.

Svorkovnice je poměrně rozměrná, aby umožnila připojení i hliníkových vodičů. Uloženy jsou v ní odrušovací kondenzátory, zapojené podle obr. 229. Vinutí pomocných pólů je vzhledem k souměrnosti zapojeno po obou stranách kotvy.

Řez motorem typu SM 132 S (1,7 kW, 1400 min⁻¹, 220 V, MEZ Brno, n. p.) je na obr. 230.

b) Těžní motory

Motory používané k pohonu těžních strojů mají robustní konstrukci, větší počet pólů, větší průměr a menší stavební délku.

Příklad těžního stroje s litou kotrrou je na obr. 231. Stroj nemá samostatný ventilátor, stačí ventilační účinek vysokých komutátorových praporků a samotného tělesa rotorové hvězdy.

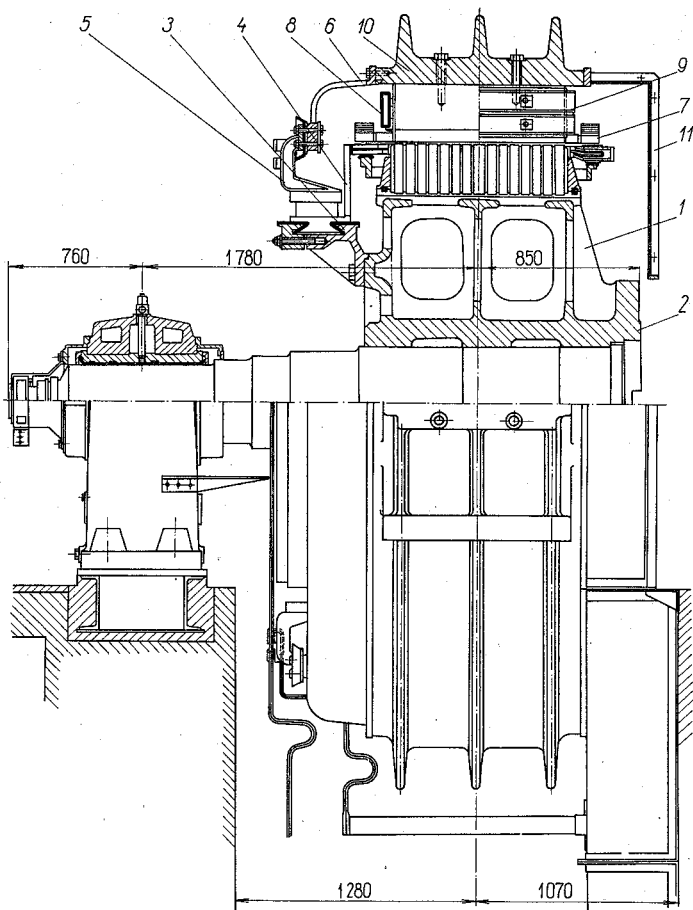
Provedení těžního stroje svařované konstrukce je na obr. 232.

c) Trakční motory

Jejich konstrukce je dána základní podmínkou velké odolnosti proti otřesům a malým prostorem pro jejich umístění. Mívají obvykle menší průměr, rotor je nasazen na tuhé hvězdě, kostra je hranatá, aby se lépe využil daný prostor pod vozidlem.

U hranaté kostry jsou póly připevněny na vyšší vyčnívající nálitky na vnitřní části kostry, aby bylo možné jednoduché a přesné opracování všech dosedacích ploch soustružením.

Obr. 230. Stejnoseměrný motor SM 132 S z jednotné řady motorů v provedení IP 23/b, M 101
1 – litinová žebrovaná postranice, 2 – budičí vinutí, 3 – stabilizační kampaundní buzení,
4 – nosný kruh, 5 – pojistná destička, 6 – maznice

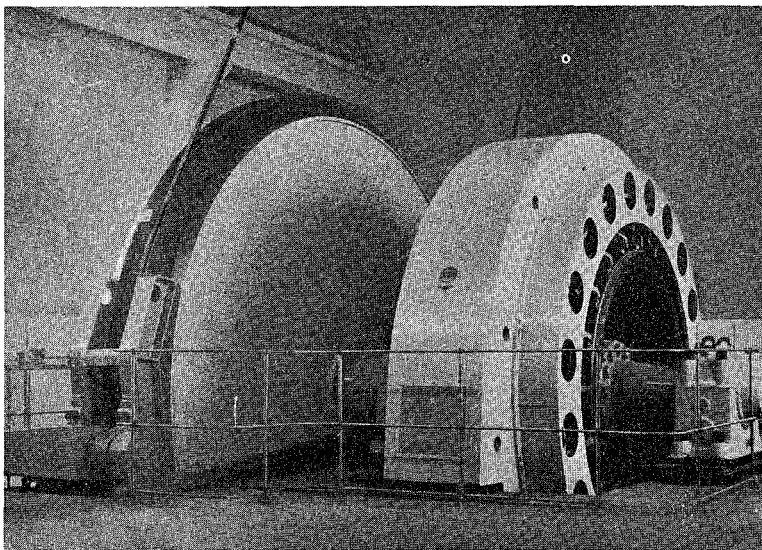


Obr. 231. Stejnoseměrný těžný motor 1720 kW, 48 min^{-1} , 630 V, 2880 A s kompenzačním vinutím

- 1 – rotorová hvězda, 2 – rotorová příruba, 3 – pouzdro komutátoru, 4 – praporky, 5 – nosič držáků kartáčů, 6 – litý kryt předních čel, 7 – kompenzační vinutí, 8 – buďící vinutí, 9 – komutační vinutí, 10 – statorová kostra, 11 – plechový kryt zadních čel

Vnitřní řešení trakčních motorů musí být jednoduché, abychom zmenšili možnost usazování nečistot, na něž je chladicí vzduch v trakčních poměrech bohatý.

Účinné větrání i při značně proměnných otáčkách a rychlostech (jízda do kopce malou rychlostí) zabezpečuje obvykle cizí ventilátor.



Obr. 232. Těžný motor typu EEQ 340-60-20, 1950 kW, 48 min^{-1} , 725 V, 2920 A ve strojovně těžní jámy s třecím kotoučem Koepple (ČKD Praha, o. p.)

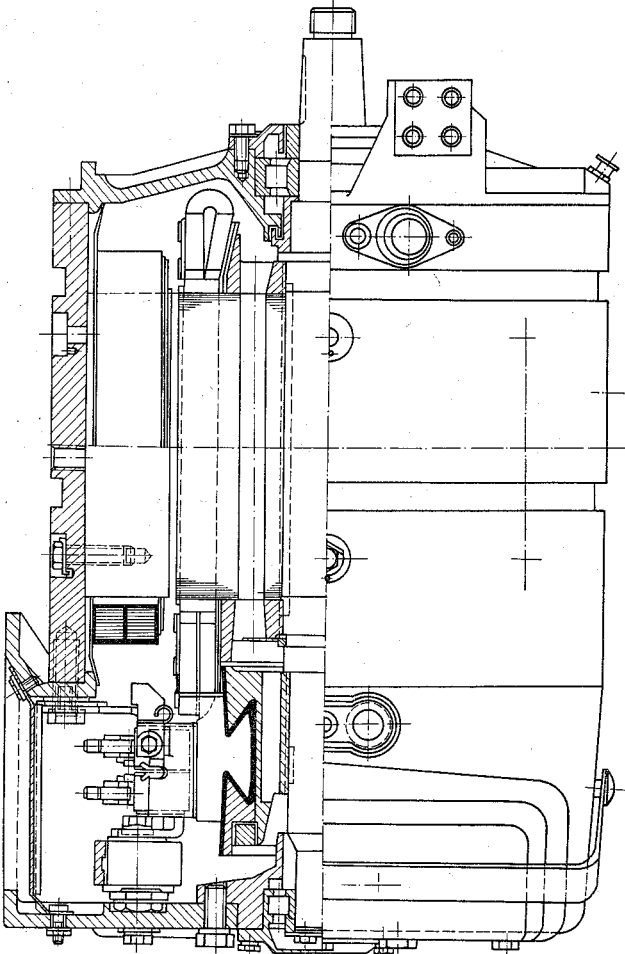
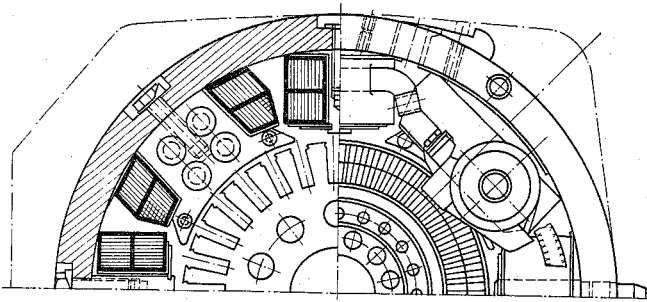
Průměr komutátoru má být stejný jako průměr rotoru, abychom nemuseli používat choulostivé praporky.

Na obr. 233 je dráhový motor naší tramvaje typu T s hodinovým výkonem 44 kW a trvalým výkonem 40 kW. Cizí větrání zajišťuje zvláštní ventilátor, poháněný motorem tzv. motorgenerátoru.

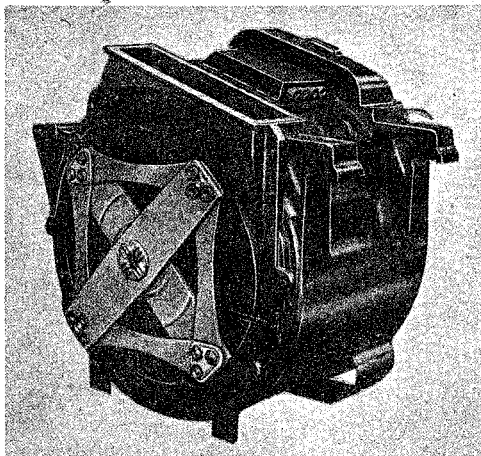
Celá tramvaj má čtyři stejné motory na napětí 300 V. Dva a dva z nich jsou trvale zapojeny do série a připojeny na trolejové napětí 600 V. Záběrný proud všech motorů je až 500 A.

Náhon na nápravy obstarává Cardanův hřídel. S ohledem na značně stísněné prostory pod vozem musí být výfukové otvory v čelních plochách ložiskových štítů. Je to velmi nevýhodné, neboť se jimi dostává do motoru voda.

Trakční motor naší první úspěšné lokomotivy E 499.0 je na obr. 234. Lokomotiva má čtyři stejné motory s hodinovým výkonem 585 kW při 600 min^{-1} a trvalým výkonem 510 kW při 630 min^{-1} . Vždy dva motory na napětí 1500 V jsou spojeny do série a připojeny k napětí 3 kV.



Obr. 233. Trakční motor 44/40 kW, 300 V pro tramvaje typu T
(ČKD Praha, o. p., závod Trakce)



Obr. 234. Trakční motor pro elektrickou lokomotivu E 499.9 – 585/510 kW, 1500 V (Škoda o. p., Plzeň)

Poměr hlavních rozměrů je volen tak, aby motor co nejlépe vyplnil prostor mezi koly. Kostra je z ocelolitiný a má válcový tvar. Patkami je motor pevně uchycen v rámu lokomotivy.

Motor je šestipólový.

Rotorové plechy i při velkém průměru 900 mm se prostřihují v celku jediným přípravkem.

Točivý moment je přenášen ocelovým hřídelem, který průběžně prochází dutinou rotorové hvězdy. Na přední straně je s ní spojen zvláštní křížovou pružnou spojkou a na zadní straně je stejnou spojkou spojen s hnacím pastorkem. Ten je uložen v samostatných ložiskách a zabírá s ozubeným kolem nápravy.

d) Trakční generátory

Jsou poháněny naftovým motorem a slouží k výrobě elektrické energie pro trakční motory motorových lokomotiv.

6. KOMUTÁTOROVÉ MOTORY NA STŘÍDAVÝ PROUD

6.1. ZÁKLADNÍ POJMY

6.1.1. Význam a rozdělení

Střídavé komutátorové motory v sobě sdružují výhodné regulační vlastnosti stejnosměrných motorů s výhodou přímého připojení ke střídavé síti.

Indukční stroje při všech svých přednostech nejsou vhodné v takových pohonech, kde požadujeme plynulou a širokou regulaci otáček. Kroužkový indukční motor můžeme v omezeném rozsahu řídit změnou odporu rotorového obvodu, ale tato regulace je ztrátová a motor se zařazeným odporem v rotorovém obvodu drží špatně nastavené otáčky čímž ztrácí jednu ze svých význačných vlastností.

Podle počtu fází rozdělujeme komutátorové motory na

1. jednofázové,
2. trojfázové.

Rotor tvoří normální stejnosměrná kotva s komutátorem a stator má u menších jednofázových strojů vyjádřené póly, větší jednofázové a všechny trojfázové stroje mají stator s rozloženým vinutím uloženým v drážkách.

Protože se statorovým obvodem uzavírá střídavý magnetický tok, musí být složen z dynamových plechů.

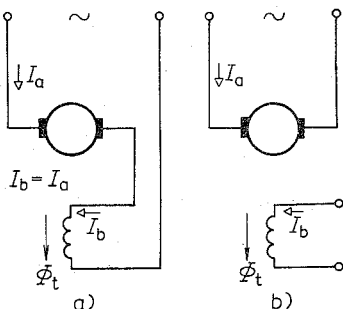
Komutátor těchto motorů působí jako měnič kmitočtu.

Používané druhy motorů na střídavý proud jsou:

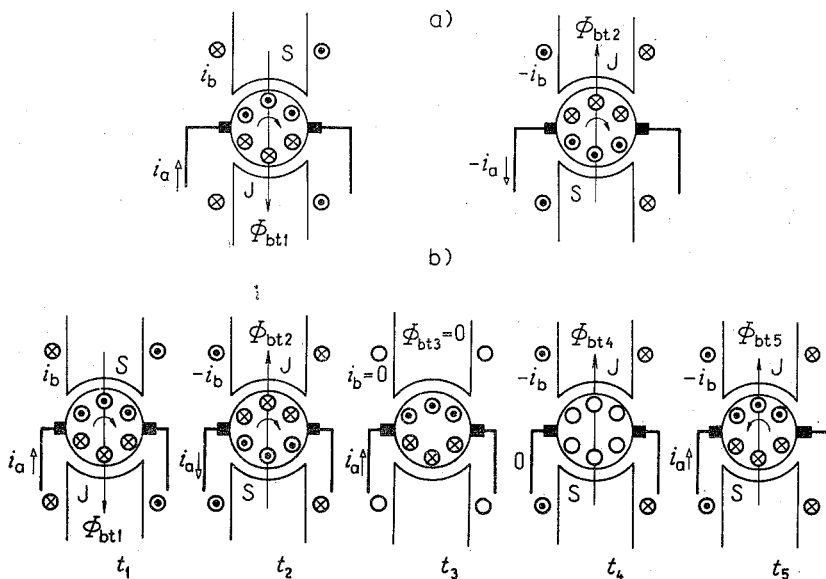
1. Jednofázový sériový motorek (univerzální), který slouží pro pohon menších spotřebičů; může být zapojen na střídavé i stejnosměrné napětí.
2. Jednofázový sériový motor, obvykle trakční.
3. Repulsní jednofázový motor, jehož otáčky lze řídit jednoduše natáčením kartáčů.
4. Trojfázový derivační motor s napájeným statorem (Winterův – Eichbergův motor).
5. Trojfázový derivační motor s napájeným rotorem (Schrageho motor).
6. Trojfázový sériový motor.

6.1.2. Tažná síla ve střídavém magnetickém poli

Na obr. 235 je jednoduché schéma jednofázového motoru se sériovým zapojením kotvy a budícího vinutí. I když vinutím kotvy a budícím vinutím prochází v každém okamžiku proud jiného smyslu, na vodiče kotvy působí síla vždy stejného smyslu, neboť smysl proudu v kotvě a polarita pólů se mění současně (obr. 236a).

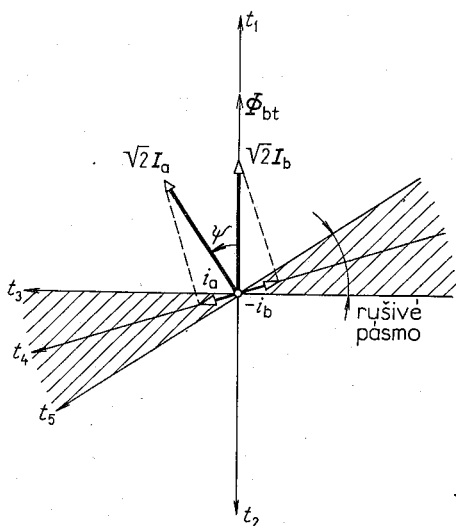


Obr. 235. Jednoduché schéma jednofázového komutátorového motoru



Obr. 236. Smysl tažné síly
a) při sériovém zapojení kotvy a buzení, b) při napájení různými proudy

Na obr. 236b je obecné schéma, v němž se kotva i budící vinutí napájí různými proudy (I_a , I_b), posunutými proti sobě o úhel ψ . Fázorový diagram proudů je na obr. 237. Změna smyslu a velikosti obou proudů neprobíhá už současně. Pokud okamžité hodnoty (jejich průměty do časové přímky t) mají stejnou polaritu, vzniká tažný moment stejného smyslu. Pro zvolenou polaritu na obr. 236b je moment pravotočivý (určí se pravidlem levé ruky). Je tedy pravotočivý v okamžiku t_1 , kdy jsou oba průměty současně záporné. V okamžicích t_3 a t_4 je tažný moment nulový, neboť v nich má jeden nebo druhý proud nulovou hodnotu. Mezi těmito okamžiky, např. v čase t_5 , je moment levotočivý, neboť polarita obou proudů je rozdílná.



Obr. 237. Fázorový diagram proudů jednofázového komutátorového motoru

Šířka rušivého pásma, v němž má motor snahu otáčet se opačně, závisí na velikosti fázového posunu. U sériového zapojení je úhel $\psi = 0$ a motor táhne trvale jedním směrem. Jestliže je posun proudů velký, může být rušivé pásmo tak široké, že se motor vůbec ani jedním směrem neroztočí.

Proto se nepoužívají jednofázové derivační motory, neboť u nich je vlivem velké indukčnosti budícího vinutí fázový posun značný a motor netáhne.

Moment komutátorového motoru odvodíme z rovnice momentu stejnosměrného stroje, dosadíme-li do ní okamžité hodnoty proudu v kotvě i_a a toku Φ_{bt} .

Okamžitá hodnota magnetického toku je úměrná okamžité hodnotě budicího proudu a je dána vztahem

$$\Phi_{bt} = \Phi_b \sin \omega t$$

kde Φ_b je maximální hodnota magnetického toku, úměrná proudu $\sqrt{2}I_b$. Okamžitá hodnota proudu v kotvě je

$$i = \sqrt{2}I_a \sin(\omega t + \psi)$$

Přítom vycházíme z okamžiku, kdy je budicí proud I_b nulový, časová přímka je k proudu I_b kolmá a otáčí se doleva (obr. 237).

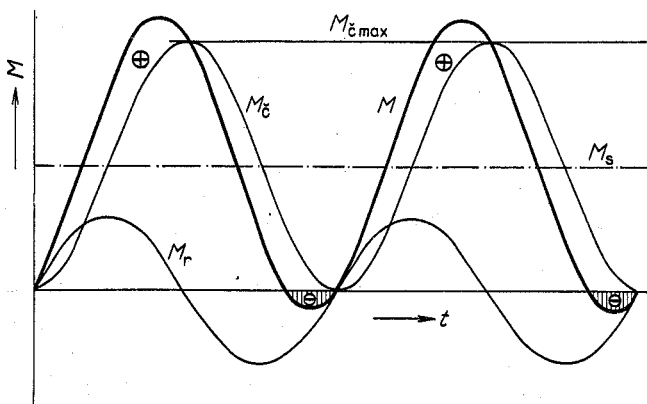
Okamžitá hodnota momentu je potom podle (388)

$$M = \frac{p}{\pi} \cdot \frac{N}{a} \Phi_{bt} i_a = \frac{\sqrt{2}p}{\pi a} N \Phi_b I_a \sin \omega t \sin(\omega t + \psi)$$

Úpravou tohoto výrazu dostaneme

$$M = \frac{\sqrt{2}p}{\pi a} N \Phi_b I_a \cos \psi \sin^2 \omega t + \frac{p}{\sqrt{2}\pi a} N \Phi_b I_a \sin \psi \sin 2\omega t \quad (408)$$

Okamžitá hodnota momentu je v každém okamžiku jiná (závislost na čase t) a skládá se ze dvou složek (obr. 238).



Obr. 238. Průběh momentu jednofázového sériového motoru

1. Činný moment M_{ε} je trvale kladný a kmitá od nuly do maximální hodnoty

$$M_{\varepsilon \max} = \frac{\sqrt{2}p}{\pi a} N \Phi_b I_a \cos \psi \quad (409)$$

2. Reakční moment M_r kmitá s dvojnásobným kmitočtem a je střídavě kladný i záporný, takže činnost motoru narušuje.

Výsledný moment je dán součtem obou složek a kromě kladných hodnot vykazuje ve svém průběhu i záporné hodnoty, odpovídající rušivému pásmu na obr. 236.

Celkový účinek reakčního momentu v průběhu jednoho kmitu je nulový, takže střední hodnota užitečného momentu je dána vztahem

$$M_s = \frac{M_{\varepsilon \max}}{2} = \frac{p}{\pi \sqrt{2} a} N \Phi_b I_a \cos \psi \quad (410)$$

Porovnáním s rovnicí (388) je vidět, že moment komutátorového motoru na střídavý proud je v poměru $\cos \psi / \sqrt{2}$ menší než moment stejnosměrného stroje.

6.1.3. Napětí indukované působením střídavého magnetického pole

Napětí indukované ve vinutí stejnosměrné kotvy a měřené na kartáčích stroje bylo dáno vztahem

$$U_i = 4f_v \Phi \frac{N}{2a}$$

U komutátorového motoru na střídavý proud se magnetický tok s časem mění, takže i okamžitá hodnota indukovaného napětí bude v každém okamžiku jiná

$$u_i = 4f_v \Phi_{bt} \frac{N}{2a} = 4f_v \frac{N}{2a} \Phi_b \sin \omega t \quad (411)$$

kde f_v je kmitočet napětí ve vodičích kotvy, je podobně jako u stejnosměrného stroje dán vztahem

$$f_v = \frac{pn}{60}$$

a nezávisí na kmitočtu sítě, k níž je stroj připojen.

Z rovnice (411) je vidět, že napětí na krouzcích komutátoru je ve fázi s magnetickým tokem a jeho kmitočet souhlasí s kmitočtem magnetického toku, tedy i s kmitočtem sítě, která budící vinutí napájí.

Komutátor tedy působí skutečně jako měnič kmitočtu, kmitočet f_v (závislý na otáčkách) se mění na kmitočet sítě f_s . Na základě toho můžeme kotvu paralelně spojit s budícím vinutím a napájet ze společné sítě, což se využívá právě u trojfázových regulačních motorů.

Efektivní hodnota pohybového napětí na kartáčích komutátoru je dána vztahem

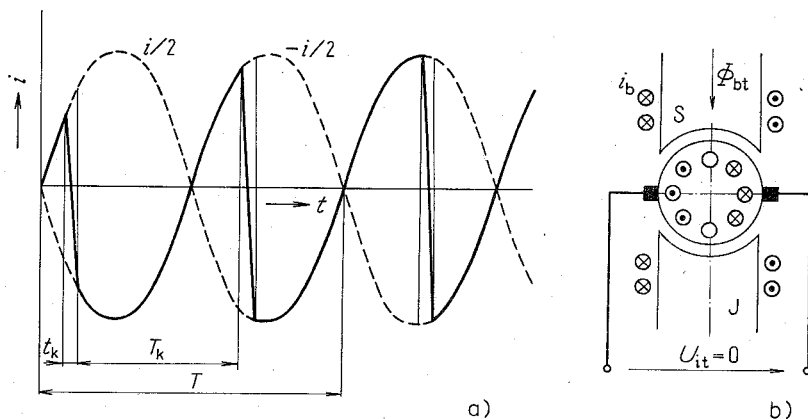
$$U_{ip} = \frac{4}{\sqrt{2}} f_v \frac{N}{2a} \Phi_b = 2\sqrt{2} f_v N_s \Phi_b \quad (412)$$

kde N_s je počet závitů spojených do série.

Kmitočet tohoto indukovaného napětí se rovná kmitočtu napájecí sítě a nezávisí na otáčkách kotvy; na otáčkách je závislé jen napětí.

Poměry v kotvě střídavého stroje jsou ale složitější než v kotvě stejnosměrného stroje, neboť kromě pohybového napětí se v kotvě střídavého stroje indukuje i tzv. *transformační napětí*.

Vinutí kotvy si můžeme představit jako sekundární cívku transformátoru. Napětí se v ní indukuje střídavým magnetickým tokem budícího vinutí (magnetů) tak, jak je to vyznačeno na obr. 239b, sekundární proudy mají opačný smysl než proudy primární. Z obr. 239b je vidět, že



Obr. 239. Komutace komutátorového motoru
a) průběh proudu v komutující cívce, b) vznik transformačního napětí

pokud jsou kartáče v neutrální poloze, jednotlivá transformační napětí ve vodičích kotvy se ruší. Uplatní se jen v těch cívkách, které jsou během komutace spojeny nakrátko a velmi nepříznivě ovlivňují její průběh.

6.1.4. Komutace ve střídavém magnetickém poli

Stejně jako u stejnosměrného stroje i u komutátorového stroje na střídavý proud se musí za dobu komutace t_k změnit proud v komutující cívce z hodnoty $i/2$ na hodnotu $-i/2$. Komutující proud je ale střídavý, s kmitočtem sítě f_s , takže komutace určité cívky nastává vždy při jiné velikosti proudu (čas mezi dvěma komutacemi T_k závisí na otáčkách a nesouhlasí s dobou kmitu). Z obr. 239a je zřejmé, že při každé komutaci je časová změna proudu jiná, a je tedy i jiné *reaktanční napětí*

$$u_r = L_c \frac{di}{dt} \quad (413)$$

Toto reaktanční napětí můžeme alespoň částečně potlačit pomocnými póly, zapojenými do série s kotvou.

Kromě reaktančního napětí U_r ovlivňuje nepříznivě komutaci *transformační napětí*, které právě v komutující cívce dosahuje maximální hodnoty, neboť v okamžiku komutace je cívka kolmá k směru magnetického toku. Efektivní hodnota transformačního napětí je stejně jako u transformátoru dána vztahem

$$U_{it} = 4,44 f_s \Phi_b N_c \quad (414)$$

a předbíhá před magnetickým tokem o $\pi/2$.

Toto napětí můžeme zrušit stejně velkým napětím $U_k = -U_{it}$, které se indukuje pohybem komutující cívky v poli pomocných pólů s tokem Φ_k . Protože pohybové napětí je ve fázi s magnetickým tokem, tento tok předbíhat tok magnetů také o $\pi/2$.

Nevýhodou je, že kompenzace je možná jen za chodu, neboť pokud kotva stojí, je pohybové napětí U_k nulové. Proto komutátor při rozběhu značně jiskří. Aby na komutátoru nevznikl nebezpečný oblouk, nesmí transformační napětí překročit 2,5 V.

Aby i při této omezující podmínce bylo možné získat na jeden pól co největší magnetický tok a tím i výkon, mívá vinutí kotvy v cívce jen jeden závit a z téhož důvodu byly první trakční jednofázové motory

napájeny proudem o kmitočtu $16\frac{2}{3}$ Hz, při kterém vychází maximální možný tok třikrát větší než při kmitočtu 50 Hz. Při kmitočtu $16\frac{2}{3}$ Hz až 25 Hz bylo možné dosáhnout na jeden pól výkonu 40 až 50 kW.

Vinutí s jedním závitem v cívce musí mít při určitém napětí přiměřeně větší počet cívek, a tedy i větší počet lamel. Lamely vycházejí úzké a stejně úzké musí být i kartáče, aby současně komutovalo jen málo cívek.

Velké jednofázové motory mají pro dosažení lepší komutace vždy pomocné póly i kompenzační vinutí na potlačení reakce kotvy. Pro dosažení odporové komutace a pro omezení zkratového proudu v komutující cívce se používají kartáče z tvrdého grafitu s větším přechodovým odporem a odporové spojky mezi vinutími a lamelami.

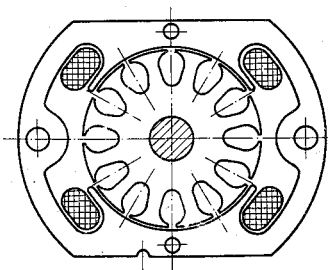
Zbývající podmínky dobré komutace jsou stejné jako u stejnosměrných strojů, ale musí se ještě přesněji dodržet.

S ohledem na komutaci se mohou komutátorové motory používat jen na nižší napětí. Při vyšším rozvodném napětí (např. u jednofázové trakce) se musí motor napájet přes snižovací transformátor.

6.2. JEDNOFÁZOVÝ SÉRIOVÝ MOTOR

6.2.1. Jednofázový sériový (univerzální) motorek

Jednofázové sériové motorky jsou nejrozšířenějšími komutátorovými stroji na střídavý proud. Používají se k nejrůznějším účelům, zejména tam, kde se žádají větší otáčky, než jakých lze dosáhnout indukčním motorem. Slouží k pohonu ručního náradí, ventilátorů, počítačích strojů, zubolékařských vrtaček, vysavačů, kuchyňských strojů apod. Mohou pracovat i při napájení stejnosměrným proudem, proto se nazývají univerzální.



Obr. 240. Magnetický obvod univerzálního motorku

Magnetický obvod univerzálního motorku je velmi jednoduchý (obr. 240). Stroj je obvykle dvoupólový, póly se jhem jsou prostříženy vcelku, pomocné póly se nepoužívají.

Výkon při napájení stejnosměrným proudem je

$$P_{=} = UI$$

a při napájení střídavým napětím

$$P_{\sim} = UI \cos \varphi$$

Príslušné momenty při zanedbání ztrát jsou

$$M_{=} = \frac{60}{2\pi n_{=}} UI \quad (415)$$

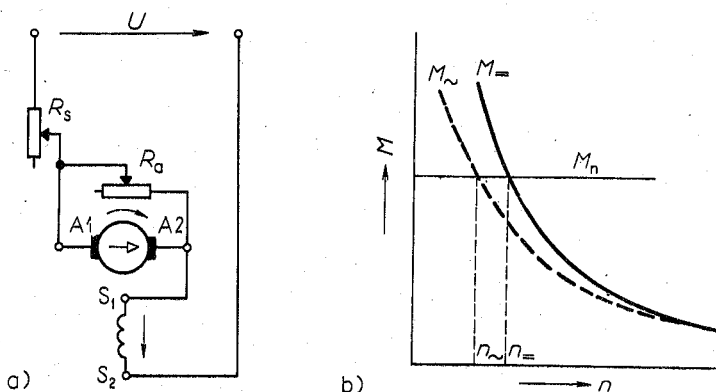
$$M_{\sim} = \frac{60}{2\pi n_{\sim}} UI \cos \varphi \quad (416)$$

Při stejném momentu vyjde i poměr otáček

$$\frac{n_{\sim}}{n_{=}} = \cos \varphi \quad (417)$$

Otáčky při napájení stroje střídavým proudem jsou tedy menší než při napájení stroje stejnosměrným proudem

$$n_{\sim} = n_{=} \cos \varphi \quad (418)$$

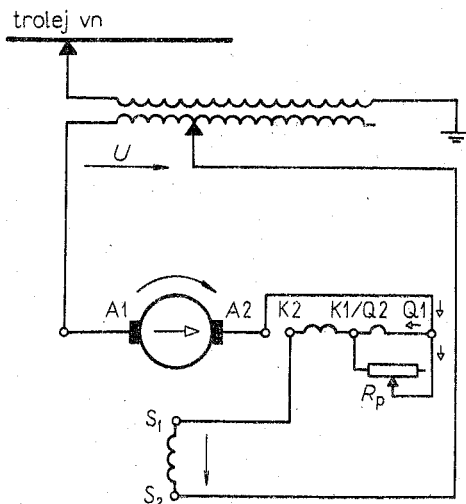


Obr. 241. Univerzální motorek
a) schéma, b) momentová charakteristika

Momentová charakteristika pro oba druhy proudů je sériová (obr. 241b). Výhodou sériového motoru je velký záběrný moment. Velká závislost otáček na zatížení drobným spotřebičům obvykle nevádí. Jmenovité otáčky bývají v rozsahu 2000 až 10 000 min^{-1} , při větších otáčkách pracuje motor s lepším účínkem.

Otáčky lze jednoduše řídit proměnným odporem zařazeným do série s motorem nebo výhodněji jeho paralelním připojením ke kotvě (tzv. Barkhausenovo zapojení, obr. 241a). Takovéo řízení mají např. zubolékařské vrtačky.

Poznámka. Komutátorové jednofázové motorky musí být odrušeny, aby nerušily poslech rozhlasu a televize. Odrušení se dělá připojením kondenzátorů, např. podle obr. 229. Sériové budící vinutí, umístěné na dvou pólech, se musí ke kotvě připojit souměrně tak, jak je naznačeno ve schématu na obr. 229.



Obr. 242. Schéma jednofázového komutátorového trakčního motoru

6.2.2. Jednofázový sériový trakční motor

Jednofázové sériové motory většího výkonu se používají výhradně jako motory trakční.

Dnes můžeme předpokládat, že tyto motory nemají velké vyhlídky na rozšíření, neboť elektrifikace železnic střídavým proudem vysokého napětí (úspory na trolejovém vedení, stožárech a závěsném materiálu) byla úspěšně vyřešena výhodnějším použitím měničových lokomotiv.

U nás se jednofázové motory pro trakční účely ani nepoužívají, ani nevyrábějí.

Schéma zapojení trakčního jednofázového motoru se snižovacím transformátorem je na obr. 242.

Motor má tři vinutí: budicí, kompenzační a komutační (nastavitelné odporem R_p). Všechna jsou uložena v tělese drážkovaného statoru.

6.3. TROJFÁZOVÉ KOMUTÁTOROVÉ REGULAČNÍ MOTORY

6.3.1. Trojfázový komutátorový motor s napájeným státorem (Winter-Eichberg)

Byl vynalezen roku 1900 a podle vynálezců dostal i název. Jeho základní schéma je na obr. 243.

Normální statorové trojfázové vinutí je připojeno na trojfázovou síť. Kotva je stejnosměrná a má na komutátoru pro každou pólovou dvojici tři sady kartáčů, pootočených proti sobě vždy o 120° el. Paralelně je ke stejné síti s kmitočtem f_1 připojeno primární vinutí sběračového regulačního transformátoru, jehož sekundární vinutí je přes sběrné kladky připojeno ke kartáčům komutátoru. Vinutí má uzel uprostřed, aby bylo možné přesouváním kladek měnit nejen velikost, ale i fázi regulačního napětí.

V praxi mívá regulační transformátor jen jedno sekundární vinutí (obr. 243 vpravo) bez uzlu. Uzel vytvářejí další tři kladky, spojené nakrátko, které se posouvají po vinutí vždy proti kladkám a – b – c, takže změny velikosti i fáze regulačního napětí se dosáhne vysouváním obou soustav kladek proti sobě jedním nebo druhým směrem.

Statorové vinutí vybudí točivé magnetické pole, jehož synchronní otáčky jsou dány kmitočtem sítě a počtem pólů

$$n = \frac{60f_1}{p} \quad (419)$$

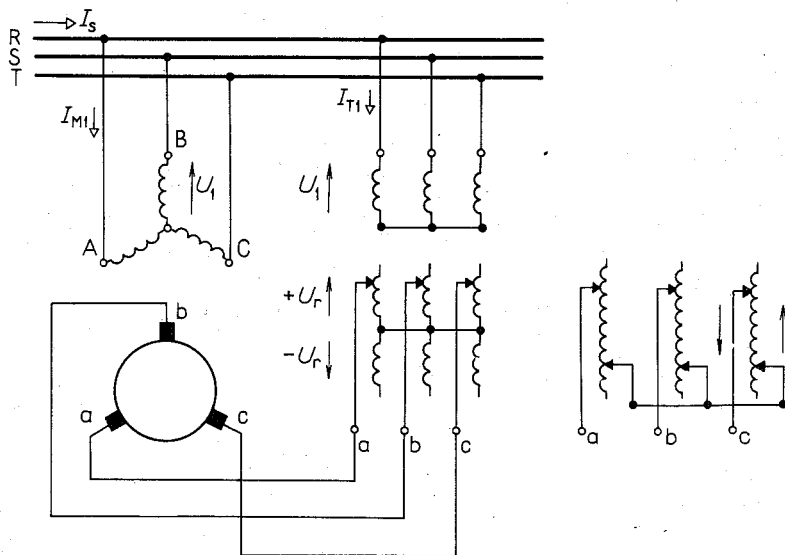
Kotva se otáčí obecně jinými otáčkami n a v jejich vodičích se indukuje napětí U_{i2} se skluzovým kmitočtem

$$f_2 = sf_1 \quad (420)$$

kde skluz je stejně jako u indukčních motorů dán rozdílem otáček

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (421)$$

Paralelní připojení rotoru ke společné síti se statorem (přes regulační transformátor) je umožněno tím, že komutátor opět působí jako měnič kmitočtu, takže kmitočet rotorového napětí mezi kartáči komutátoru se rovná síťovému kmitočtu.



Obr. 243. Trojfázový derivační komutátorový motor s napájeným statorem
(Winter-Eichberg)

Okamžitá hodnota napětí u_{i2} mezi kartáči závisí totiž na okamžité poloze osy točivého magnetického pole, stejně jako u stejnosměrného stroje závisí indukované napětí mezi kartáči na poloze kartáčů proti ose pevných pólů.

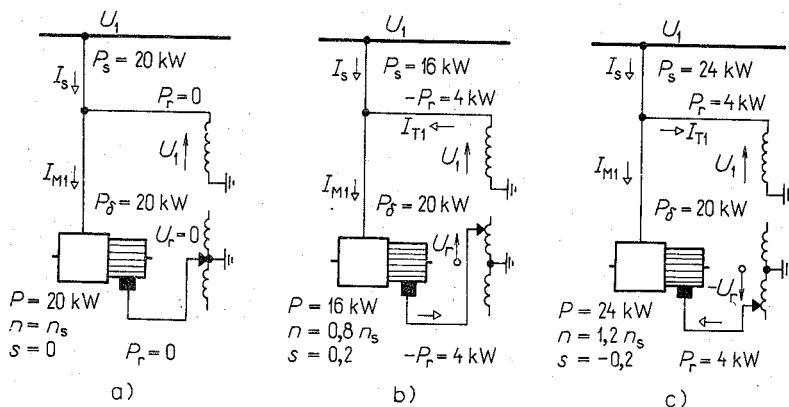
Řízení otáček využívá v podstatě principu, na jehož základě se řídí otáčky kroužkového motoru změnou velikosti odporu v rotorovém obvodu.

U kroužkového motoru se zmenšily otáčky zvětšením odporu rotorového obvodu. Moment motoru je úměrný součinu magnetického toku a proudu v rotoru. Považujeme-li magnetický tok za stálý (zanedbáme-li změny způsobené rozptylem), je moment přímo úměrný proudu v rotoru, takže za stálého momentu musí být jeho velikost stálá. Proud v obvodu rotoru je vyvozován indukovaným napětím U_{i2} , jehož velikost závisí na skluzu

$$U_{i2} = sU_{i20}$$

kde U_{i20} je napětí indukované ve vinutí stojícího rotoru ($s = 1$).

Aby i při zvětšeném odporu procházel vinutím původní proud, musí se zvětšit skluz. Skluz se musí zvětšit proto, aby při menších otáčkách byly vodiče rotoru rychleji protínány točivým polem, a tak se v nich indukovalo přiměřeně vyšší napětí U_{i2} . Menším otáčkám odpovídá při stejném momentu menší výkon rotoru, přičemž výkon točivého pole zůstává nezměněn (statorový proud daný transformačním převodem, zůstává nezměněn). Přebytek energie se mění v rotorovém odporu na teplo. Tento způsob regulace otáček motoru je nevhodný.



Obr. 244. Rozdělení výkonů při řízení otáček komutátorového motoru s napájeným státorem

Princip hospodárného řízení komutátorového motoru je vyznačen na obr. 244.

a) Pokud jsou kládky regulačního transformátoru uprostřed vinutí (obr. 244a) jsou všechny kartáče přes jeho uzel spojeny nakrátko a motor se chová jako motor s kotvou nakrátko, točí se přibližně synchronními otáčkami.

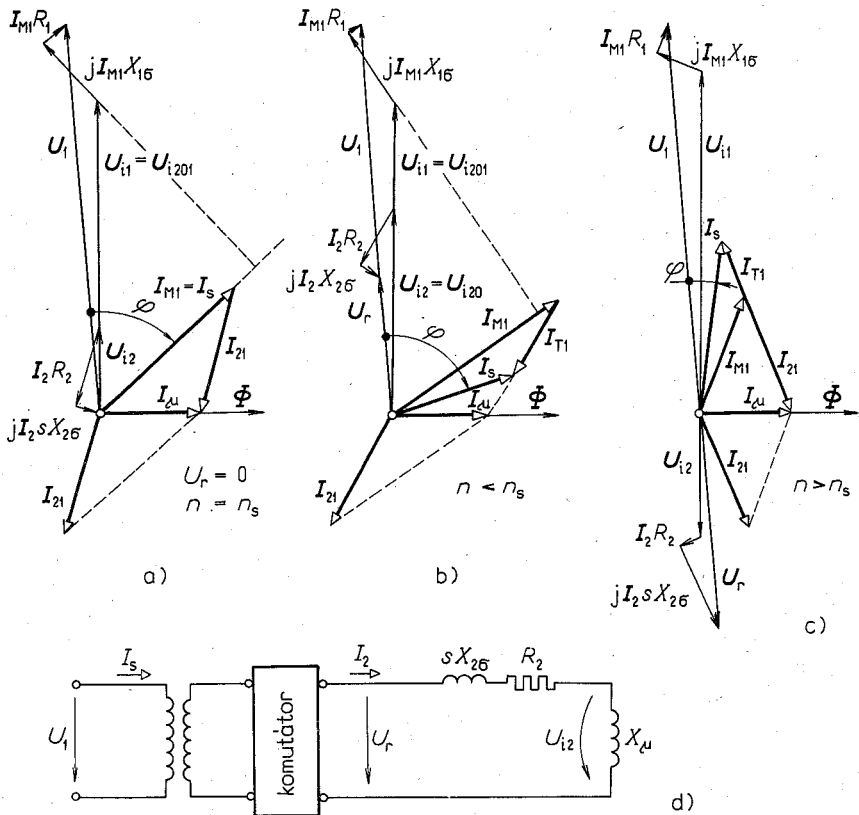
Ve vinutí rotoru se indukuje poměrně malé napětí U_{i2} , potřebné ke krytí úbytků napětí na činném odporu a na rozptylové reaktanci (obr. 245a).

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{i2} + I_2(R_2 + jsX_{\sigma 2}) &= 0 \\ \mathbf{U}_{i2} &= -I_2(R_2 + jsX_{\sigma 2}) \end{aligned} \quad (422)$$

Při zanedbání všech ztrát se výkon na hřídeli P rovná výkonu točivého pole P_δ , který je v plné míře krytý výkonem odebraným ze sítě P_s , takže

$$P_s = P_\delta = P$$

Na obr. 244a je to výkon 20 kW.



Obr. 245. Fázorový diagram a náhradní schéma motoru s napájeným státorem a) za synchronního chodu, b) za podsynchronního chodu, c) za nadsynchronního chodu, d) náhradní schéma

b) Vysuneme-li kladky regulačního transformátoru směrem nahoru (obr. 244b), přivádí se přes kartáče do rotorového vinutí regulační napětí, které je ve fázi s napětím sítě, a má tedy stejnou polaritu jako napětí indukované ve vinutí rotoru. Změnu kmitočtu přiváděného napětí f_1 na kmitočet f_2 uskutečňuje komutátor.

Působením regulačního napětí stejné polarity – obě napětí působí vlastně proti sobě (obr. 245d) – by se měl rotorový proud zmenšovat. Při stálém zatěžovacím momentu musí však proud v rotorovém vinutí zůstat stálý, a proto se musí zvětšit skluz, aby se ve zpomaleném rotoru mohlo indukovat vyšší napětí, potřebné nejen ke krytí vnitřních úbytků napětí, ale i na překonání vlivu regulačního napětí

$$U_{i2} - U_r + I_2 R_2 + jI_2 s X_{\sigma 2} = 0$$

Z toho pak

$$U_{i2} + I_2 (R_2 + js X_{\sigma 2}) = U_r \quad (423)$$

nebo když $U_{i2} = s U_{i20}$

$$s U_{i20} + I_2 (R_2 + js X_{\sigma 2}) = U_r \quad (424)$$

kde U_{i20} je napětí indukované v rotorovém vinutí, když motor stojí ($s = 1$),

$X_{\sigma 2}$ rozptylová reaktance rotorového vinutí při nulových otáčkách, kdy jsou jeho vodiče protínány indukčními čarami plnými synchronními otáčkami,

$s X_{\sigma 2}$ skutečná rozptylová reaktance rotorového vinutí při daném skluzu.

Fázorový diagram tohoto podsynchronního chodu je na obr. 245 b.

Změnou velikosti regulačního napětí stejné fáze s napětím U_{i2} můžeme plynule otáčky zmenšovat až na nulu. Řízení je bezztrátové, neboť přebytek výkonu točivého pole se neznehodnocuje v odporech, ale přes komutátor a regulační transformátor se vrací do sítě, jak je to vyznačeno na obr. 244b.

Výkon točivého pole je opět např. 20 kW, otáčky jsou zmenšeny na $0,8n_s$, takže užitečný výkon na hřídeli je $P = 0,8 \cdot 20 = 16$ kW a zbytek $P_r = P_\delta - P = 20 - 16 = 4$ kW se vrací do sítě, takže do motoru z něj přichází jen výkon na hřídeli $P = P_s = 16$ kW.

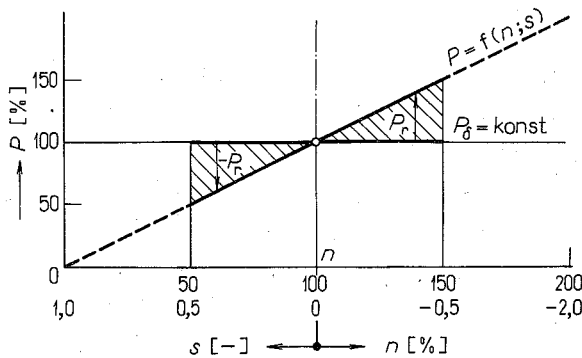
c) Přesunou-li se kladky regulačního transformátoru směrem dolů (obr. 244c), smysl regulačního napětí se obrátí. Kdyby se přitom zachoval

původní smysl indukovaného napětí v rotoru, účinek obou napětí by se sčítal a rotorovým vinutím by procházel značně větší proud. Při stálém zatížení jím však musí i za tohoto stavu procházet stejně velký proud, a proto jak to vychází z fázorového diagramu (obr. 245c) musí se smysl napětí indukovaného v rotorovém vinutí změnit. To je možné jen tak, že skluz bude záporný, což znamená, že rotor se bude otáčet nadsynchronními otáčkami. Jen potom bude platit rovnice pro rovnost napětí

$$-s\mathbf{U}_{120} + I_2(R_2 - jsX_{\sigma 2}) = \mathbf{U}_r \quad (425)$$

jíž odpovídá fázorový diagram na obr. 245c. Nyní je opačně orientován i reaktanční úbytek $-jsI_2X_{\sigma 2}$.

Na obr. 244c je vyznačen případ zvětšení otáček o 20% nad synchronní otáčky, takže výkon motoru je $1,2 \cdot P = 1,2 \cdot 20 = 24 \text{ kW}$. Výkon točivého pole je opět jen 20 kW, takže zbytek výkonu $P_r = 24 - 20 = 4 \text{ kW}$ se do motoru přivádí přes regulační transformátor. Síť tentokrát dodává plný výkon motoru $P = P_s = 24 \text{ kW}$.

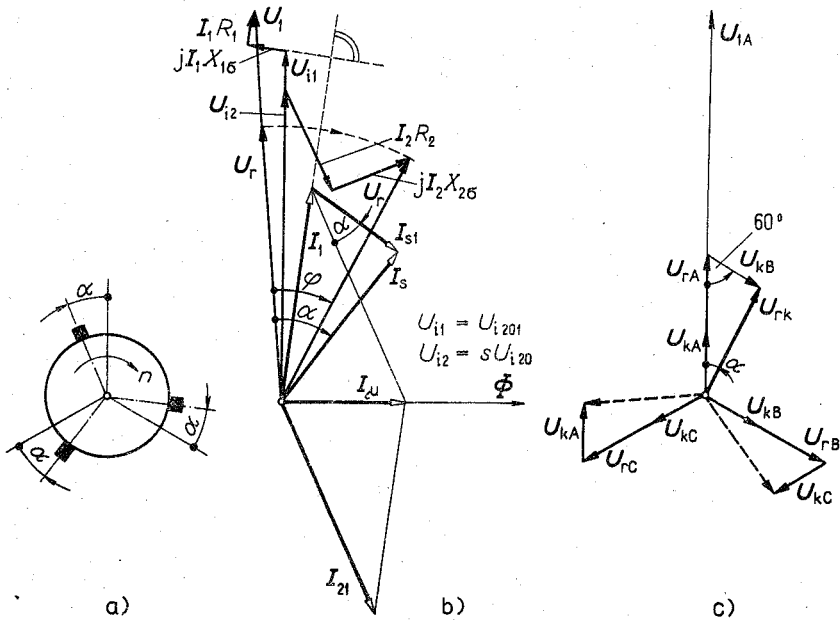


Obr. 246. Závislost otáček a výkonu trojfázového komutátorového motoru s napájeným statorem

P_s – výkon točivého magnetického pole, P_r – výkon odebraný ze sítě přes transformátor,
 $-P_r$ – výkon vrácený do sítě přes transformátor

Z uvedeného vysvětlení vyplývá, že otáčky komutátorového motoru můžeme jednoduše a hospodárně měnit pod i nad synchronní otáčky změnou velikosti a fáze řídicího napětí přiváděného rotoru.

Závislost otáček na výkonu je graficky vyznačena v diagramu na obr. 246.



Obr. 247. Kompenzace účinníku trojfázového komutátorového motoru
 a) natočením kartáčů z neutrální polohy, b) fázorový diagram, c) kompenzační složka řídicího napětí

Z diagramů na obr. 245, v nichž jsou zachyceny poměry v motoru při všech třech základních stavech, je vidět, že proud odebraný ze sítě I_s se skládá ze dvou složek – z proudu samotného motoru I_{M1} a z proudu regulačního transformátoru I_{T1} (obr. 244)

$$I_s = I_{M1} + I_{T1} \quad (426)$$

příčemž proud transformátoru I_{T1} je za podsynchronního chodu ve fázi s proudem I_{21} a za nadsynchronního chodu v protifázi. Přitom se ztrátový proud motoru a proud naprázdno transformátoru zanedbávají.

Z fázorových diagramů je dále vidět, že za nadsynchronního chodu je účinník motoru lepší než za synchronního chodu, ale za podsynchronního chodu je vlivem proudu transformátoru špatný, a proto se musí kompenzovat.

Kompenzace účinníku za podsynchronního chodu se provádí různými způsoby, např. natočením kartáčů na komutátoru o vhodný úhel α

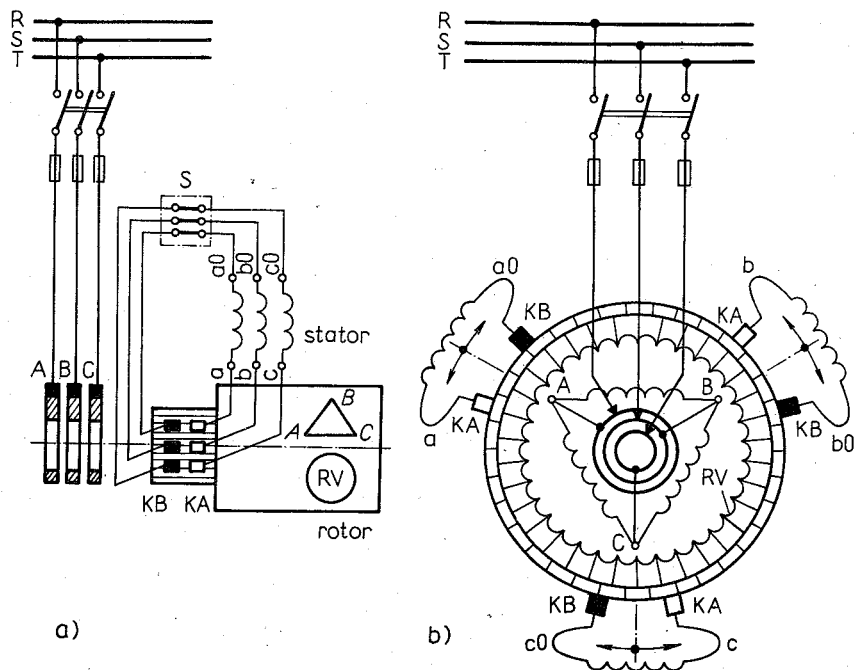
narušená nepřesnostmi, k nimž by časem mohlo dojít v důsledku opotřebování a uvolnění. Výhodou Winterova – Eichbergova motoru je právě pevné nastavení kartáčů a tomu přiměřená menší náročnost na obsluhu. Proto se u menších a středních výkonů volí stále natočení kartáčů, nastavené ve výrobních závodech. Účinek kompenzace je potom při každém zatížení a při každých otáčkách jiný.

Kromě toho se ke kompenzaci využívá stálá, tzv. synchronní kompenzační složka regulačního napětí, která se získává z pomocného kompenzačního vinutí regulačního transformátoru, zapojeného např. podle obr. 248.

6.3.2. Trojfázový komutátorový motor s napájeným rotorem (Schrage)

Vynálezcem tohoto motoru (v roce 1910) je norský inženýr H. K. Schrage.

Motor s napájeným rotorem pracuje v podstatě na stejném principu jako motor s napájeným statorem, jen jeho uspořádání je jiné (obr. 249).



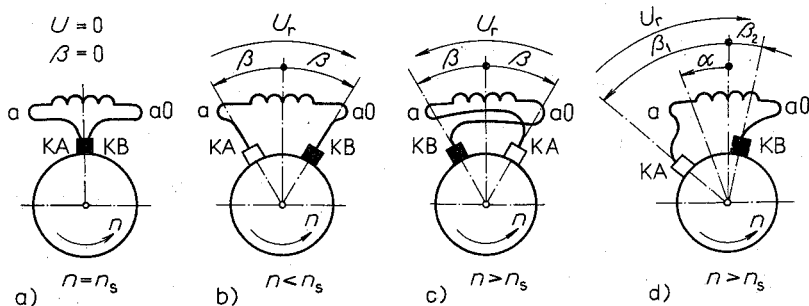
Obr. 249. Schéma trojfázového komutátorového motoru s napájeným rotorem (Schrage)

- V drážkách motoru je uloženo dvojí vinutí
- A – B – C normální trojfázové vinutí (na dně drážek), spojené do hvězdy nebo do trojúhelníka a vyvedené na tři kroužky, přes něž je připojeno na trojfázovou síť,
 - RV stejnosměrné regulační vinutí vyvedené na komutátor, které zastupuje funkci regulačního transformátoru, protože jeho napětím se napájí sekundární vinutí motoru.

Na statoru je v drážkách rozložené trojfázové sekundární vinutí a – a0, b – b0, c – c0.

Na komutátoru jsou na každou pólovou dvojici tři dvojice kartáčů (KA – KB) a na každou dvojici je vyveden začátek a konec jedné fáze statorového vinutí.

Kdyby měl např. stroj šest pólů, měl by na komutátoru $3 \times 3 \times 2 = 18$ kartáčů a každý vývod statorového vinutí by byl připojen na 3 (p) kartáče paralelně pospojované.



Obr. 250. Závislost řídicího napětí na poloze kartáčů

Dvojice kartáčů jsou uspořádány tak, že je můžeme proti sobě v obou směrech natáčet. V základní poloze, který odpovídá chodu se synchronními otáčkami (obr. 250a), leží oba kartáče jedné fáze na stejné lamelě komutátoru, takže je přes ně každá fáze statorového vinutí zkratována. Trojfázový proud odebíraný ze sítě vybudí v trojfázovém rotorovém vinutí točivé magnetické pole se synchronními otáčkami n_s . Pokud rotor stojí, vodiče zkratovaného statorového vinutí jsou protínány točivým polem plnými synchronními otáčkami a vznikne moment, který má snahu otáčet státorem. Stator je však pevný, takže stejný moment opačného směru

působí na rotor, který se jeho účinkem roztočí proti směru točení točivého pole otáčkami $n = (1 - s)n_s$. Statorové vodiče jsou potom protínány skluzovými otáčkami magnetického pole $n_s - n = sn_s$ a indukuje se v nich napětí U_{12} skluzového kmitočtu $f_2 = sf_1$ stejně jako v rotoru normálního indukčního motoru.

Točivé magnetické pole má vzhledem k vodičům rotoru stálé otáčky úměrné otáčkám synchronním n_s , a indukuje tedy ve vodičích stejnosměrného vinutí vždy stejné napětí síťového kmitočtu f_1 .

Jestliže se dvojice kartáčů KA – KB proti sobě natočí, (obr. 250b) vznikne mezi nimi jisté napětí U_r , jehož velikost je dána počtem cívek zapojených prostřednictvím lamel mezi oba kartáče. Toto napětí tedy závisí na úhlu natočení ze základní polohy β .

Kmitočet tohoto regulačního napětí je skluzový, neboť kartáče stojí a mezi ně jsou zapojeny vždy cívky se stejnou polohou v prostoru, takže točivé pole má proti nim stejně jako proti stojícím kartáčům skluzové otáčky dané rozdílem $(n_s - n)$. Tak lze toto napětí přivádět do sekundárního vinutí na statoru a využívat ho k regulaci otáček na stejném principu jako u motoru s napájením statoru.

Jestliže se fáze regulačního napětí natočením kartáčů na opačnou stranu obrátí (obr. 250c), roztočí se motor nadsynchronními otáčkami a sít mu dodává přiměřeně větší výkon. Regulace je opět hospodárná. K žádným regulačním ztrátám nedochází. Vinutí rotoru musí být ale dimenzováno na nejvyšší výkon, odpovídající největším otáčkám při daném regulačním rozsahu.

Stejnoseměrné a sekundární vinutí je dimenzováno jen na skluzový výkon.

Účinník se kompenzuje nesouměrným natočením kartáčů podle obr. 250d.

Dosažitelný výkon je velmi omezen, bývá asi 40 kW na pólovou dvojici při regulaci v poměru 1 : 2, při regulaci v poměru 1 : 6 jen 25 kW.

Obvyklý regulační rozsah bývá v rozmezí 1 : 2 až 1 : 4, naše nové motory z unifikované řady mají rozsah až 1 : 6. Pro zvláštní případy lze vyrobit motor s rozsahem až 1 : 50. Motor s větším regulačním rozsahem je větší a dražší.

Schrageho motor se spouští obvykle přímým připojením k síti při poloze kartáčů nastavené na nejmenší otáčky. Proudový náraz bývá $I_k = (1,5 \text{ až } 2) I_n$, záběrný moment $M_z = (1,5 \text{ až } 2,5) M_n$.

Větší stroje s menším regulačním rozsahem nebo stroje pro těžké rozběhové poměry se spouštějí s použitím spouštěcího odporu. Ten se zapojuje do obvodu sekundárního vinutí prostřednictvím satorové svorkovnice (S — obr. 249a) a obvykle stačí jeden stupeň, který se po rozběhu zvláštním stykačem vyřadí.

6.3.3. Použití trojfázových komutátorových motorů

Velkou předností regulačních komutátorových motorů je jejich téměř derivační charakteristika a také to, že je můžeme napájet přímo z rozvodné sítě průmyslového kmitočtu. Používají se tam, kde se žádá široká regulace otáček a kde by nebylo hospodárné instalovat stejnosměrné regulační stroje.

Regulační komutátorové motory jsou zvláště výhodné v textilním průmyslu, zejména pro pohon spřádacích strojů, u nichž se žádá velmi jemná a plynulá regulace otáček spřádaného vlákna, aby byla zaručeno jeho stálé napnutí, umožňující větší pracovní rychlost.

Podobně komutátorový regulační motor výborně vyhovuje pro pohon speciálních strojů v papírnách, gumárnách a tiskárnách. Stroje mívají i několik samostatných motorů s navzájem vázanou regulací. Obvykle vyžadují kromě běžných provozních otáček i zvláště malé otáčky při zatahování na začátku pracovního procesu. Aby stroj nemusel mít zbytečně velký a nevyužitý regulační rozsah, je výhodné malé otáčky zajistit zvláštním indukčním motorem, který přes volnoběžku pohání stroj s vhodným převodem.

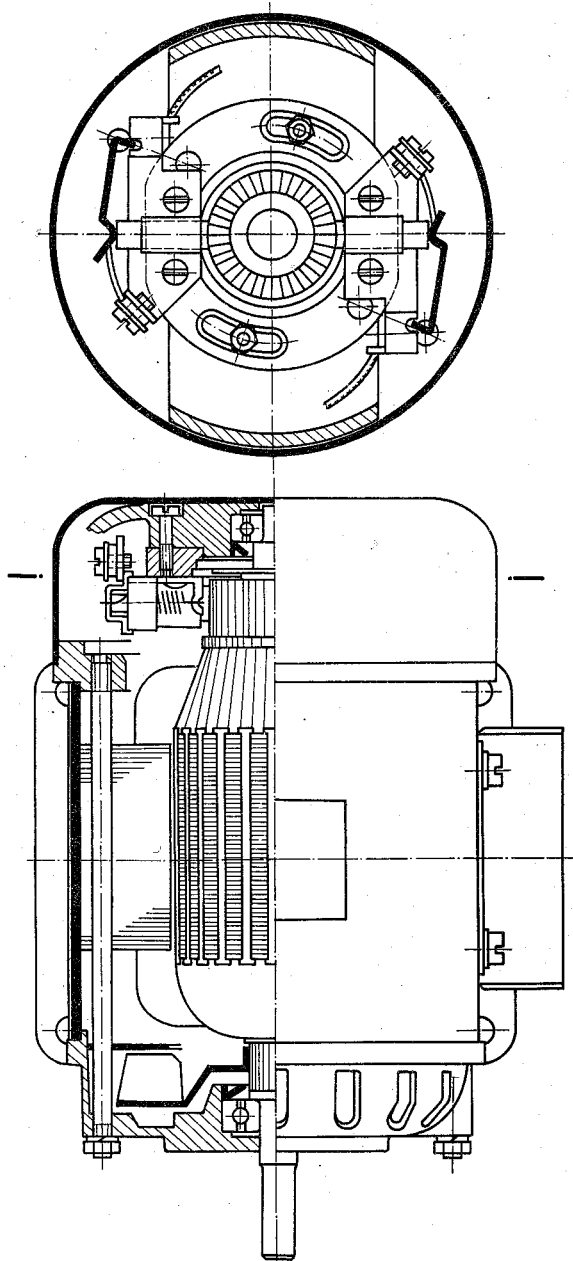
Motor s napájeným statorem je vhodný zejména jako dynamometr pro hospodárné zatěžování zkoušených točivých strojů. Je schopný i generátorického chodu, takže odbrzděnou energii vrací do sítě.

Kromě toho komutátorové motory vyhoví ještě v těchto pohonech:

1. Ve sklárnách pro pohon automatických lisů na výrobu lahví, žárovkových baněk apod.

2. V hutích pro pohon speciálních jemných válcovacích stolic (jemné dráty, profily, fólie), které s ohledem na různý sortiment vyžadují různé provozní otáčky.

3. V cementárnách pro pohon rotačních pecí a baliček cementu, stejně jako pro pohon různých transportérů v automatizovaných provozech.



Obr. 251. Sériový komutátorový motorek K3K (MEZ Náchod, n. p.)

4. Ve strojírenských závodech pro pohon speciálních obráběcích strojů, které vyžadují různé pracovní otáčky, aby i při rozmanitém použití byly plně využity.

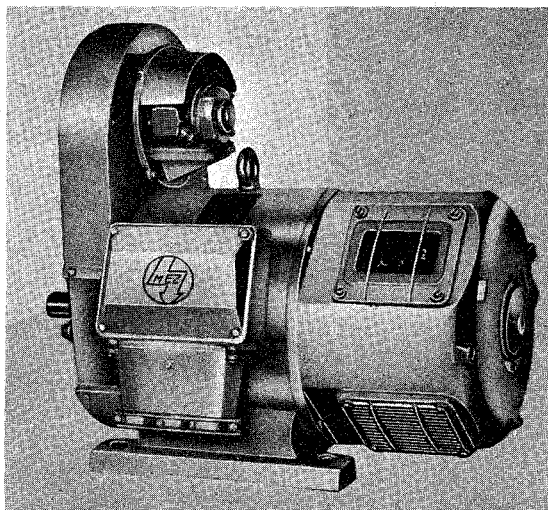
V poslední době vzniká pro komutátorové motory vážný konkurent – stejnosměrný motor napájený z řízeného polovodičového usměrňovače.

6.4. KONSTRUKCE TROJFÁZOVÝCH KOMUTÁTOROVÝCH MOTORŮ

V ČSSR došlo v posledních letech k rozsáhlé unifikaci regulačních komutátorových motorů, které tvoří jednotnou řadu se stejnosměrnými motory.

Na obr. 251 je řez malým sériovým motorkem typu K3K (MEZ Náchod, n. p.), který se vyrábí pro výkony od 8 W do 200 W s otáčkami v rozsahu 2000 až 10 000 min^{-1} .

Motory se vyrábějí ve velkých sériích a tomu odpovídá i jejich řešení. Kostru a štíty mají stříkané z lehkých slitin. Celý magnetický obvod je složen z prostřihávaných dynamových plechů tvaru znázorněného na obr. 240. Budicí cívky vinuté tenkým vodičem se navíjejí na šabloně většího průměru, takže je lze pohodlně nasunout na pól přes jeho nástavec.



Obr. 252. Regulační trojfázový komutátorový motor s napájením statorem z jednotné řady motorů typu K

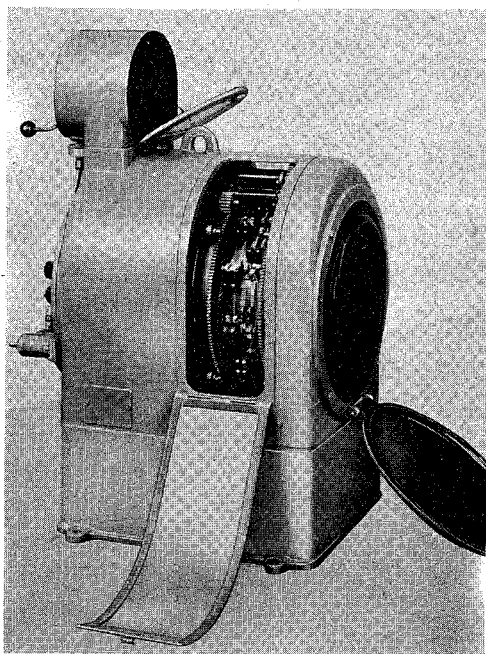
Jejich trvalá poloha se potom zajistí roztažením ve směru podélné osy, takže se dobře usadí do prostoru mezi nástavcem a jhem.

Stejnoseměrná kotva má vinutí vyráběné obvykle na navíjecích strojích. Komutátor je lisovaný, kartáče s držáky jsou upevněny v prostoru mezi póly, kde je pro ně obvykle více místa. Ložiska jsou kuličková nebo i kluzná v samomazném provedení, podobně jako u indukčních motorů.

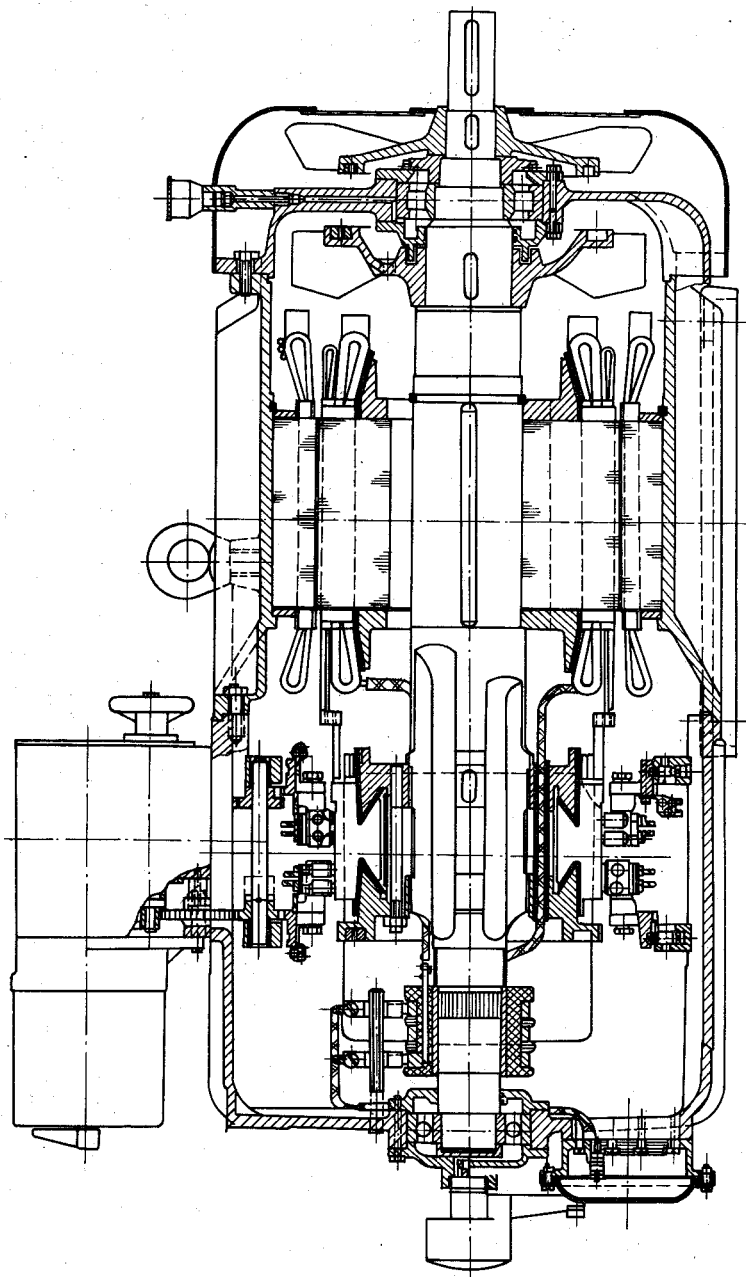
Sériové motorky bývají často umístěny přímo v poháněném stroji, se kterým tvoří jeden celek.

Fotografie nového typu komutátorového motoru s napájeným statorem z jednotné unifikované řady komutátorových motorů typu K s cizí ventilací je na obr. 252 (MEZ Vsetín, n. p.).

Na obr. 253 je příklad moderního textilního motoru vyráběného v n. p. Škoda Plzeň. Je to Schrageho motor typu TT 3425 E/6 o výkonu 10/3,1 kW, 1400/500 min⁻¹, 3 × 380 V. Slouží pro pohon spřádacího stroje. Reguluje se natáčením sběracího ústrojí ruční pákou nebo automaticky servomotorkem ovládaným spřádacím regulátorem, který je upevněn



Obr. 253. Textilní regulační spřádací motor 10/3,1 kW, 1400/500 min⁻¹, se spřádacím regulátorem (Škoda o. p., Plzeň)



Obr. 255. Trojfázový komutátorový motor s napájeným rotorem

v horní části statorové kostry. Regulátor je poháněn od řídicího mechanismu spřádacího stroje kloubovými hřídeli přes převodové skříně s převodem 1 : 1 nebo 1 : 28.

· Motory jsou pro oba směry točení.

Zavřená kostra s přívodem a odvodem vzduchu vyhovuje pro prostředí s nebezpečím ohně prvního a druhého stupně.

Na obr. 254 je příklad konstrukce trojfázového regulačního komutátorového motoru s napájeným statorem. Motor má výkon 2,3/0,135 kW při 1700/100 min⁻¹ a při napětí 3 × 380 V. Je vzavřeném provedení s povrchovým chlazením.

Na obr. 255 je řez zavřeným komutátorovým motorem s napájeným rotorem. Stroj má vlastní povrchové chlazení a vyrábí se v tomto provedení pro výkony od 0,9 do 18 kW, s regulačním rozsahem 1 : 3, pro napětí 220, 380 a 500 V.

REJSTŘÍK

Alnico 229

alternátor 258

– bezkroužkový 289

– heteropolární 304

– homopolární 303

– jednofázový 295

askarel 116

autotransformátor 88

Brzda indukční 147, 228

brzdění dynamické 372

– nadsynchronní 229

– protiproudem 228, 373

– stejnosměrného motoru 371

budič 260

Činitel deformační 278

– dodatečných ztrát 57

– rozptylu 198

– vazby 198

– vinutí 172

číslo Hobartovo 350

– nadproudové 99

Delor 116

diagram kruhový 201

drážky turboalternátorů 321

dvojčívka desková 126

Fázování synchronních strojů 292

Generátor drápkový 304

– indukční 147, 226

– trakční 393

Hranice stability 276

hvězda lomená 69, 72

hydroalternátor 311

Chladič vodní 114

chlazení 18

– komorové 319

– točivého stroje 237, 322

– transformátoru 112

– trubkové motoru 249

charakteristika momentová indukčního mo-
toru 188, 206

– – stejnosměrného motoru 369

– naprázdno stejnosměrného stroje 360

– – synchronního stroje 264

– tlumivky 104

– vnější stejnosměrného stroje 357, 359

– vnitřní stejnosměrného stroje 342

– zatěžovací stejnosměrného stroje 357

chyba-napětí 97

– proudu 98

Impedance transformátoru 53

indukčnost rozptylová 59

Jednotka indukční regulační 255

Kanály chladicí transformátoru 120

kartáče kapalinové 384

kompenzátor synchronní 258, 274

kompenzace účinníku 410, 414

komutace 328, 347, 353

– indukční 349

– komutátorového motoru 399

kondenzátor odrušovací 387

– rozběhový 233

konstrukce indukčního motoru 149

konvertor synchronní 258

krok cívkový 161

- krok drážkový 331
 - komutátorový 331
 - stranový 331
- klec Boucherotova 216
 - odporová 215
 - vírová 218
- kruhy kapacitní 128
- krytí 17, 18
 - pólové 339
- kývání synchronního stroje 269
- Ložisko segmentové 313
- Měnič kmitočtu indukční 147, 235
- měřítka kruhového diagramu 205
- moment činný 398
 - indukčního motoru 188
 - reakční 284, 398
 - rozběhový nejmenší indukčního motoru 207
 - stejnosměrného motoru 365
 - synchronní 284
 - synchronního stroje 282
 - výsledný 398
 - záběrný 189
 - – stejnosměrného motoru 370, 376
 - zvratu 189
- motor jednofázový, zapojení 232
 - – komutátorový 395
 - krokový 301
 - kroužkový 150, 219
 - lineární 257
 - reakční synchronní 285, 298
 - Schrage 412
 - synchronní 261, 295
 - těžní 389
 - trakční 389, 403
 - Winter-Eichberg 404
- motorek univerzální 401
 - zubový synchronní 299
- Napětí indukované 31, 49
 - – synchronního stroje 263
 - – ve vinutí stejnosměrného stroje 340, 356
- napětí izolační 103
 - lamelové 353
 - nakrátko 53, 55, 61
 - reaktanční 400
 - transformační 399
 - zapalovací 92
- nádoba dilatační 24, 133
 - transformátoru 131
- nádoby transformátoru 111
- nerovnoměrnost chodu 270
 - spouštění 222
- Obruče bandážovací 318
- obvod magnetický indukčního motoru 172, 174
 - – transformátoru 26, 116
- odbuzovač 291
- odklápeč kartáčů 221, 244
- odpor jedné fáze klece 193
 - spouštěče 222
- olej transformátorový 135
- otáčky průběžné 312
 - , řízení 223
 - synchronní 156
- Páska bandážovací 120
- pásmo rušivé 396
- permutace vinutí 128
- plán stříhací 118
- počet drážek na pól a fázi 161, 163
- pole magnetické stejnosměrného stroje 327
 - točivé eliptické 232
 - – kruhové 153
- poloha neutrální 348, 351
- posun fázový vnitřní 269
- póly komutační 346, 352
 - stíněné 234
- proud magnetizační 65
 - – indukčního motoru 173, 178
 - – transformátoru 38, 40
 - nakrátko 54, 56
 - – poměrný 280
 - – trvalý 282
 - – ustálený 280

proud naprázdno transformátoru 40
– zkratový 280
– – nárazový počáteční 281
průchodky kondenzátorové 133
průřez aktivní 136
– geometrický 136
přepínač odboček Jansenův 83
– Y/D 212
přesytka 108
přetížitelnost momentová 204, 206
převod 76
– transformátoru 33
příkon měrný magnetizační 40

Radiátory 113
reakce kotvy stejnosměrného stroje 343
– – synchronního stroje 265, 275
reaktor 107
reaktance magnetizační indukčního motoru 184
– podélná 268, 278
– procentní tlumivky 104
– příčná 278
– rozptylová transformátoru 58
– synchronní 268, 271
– – podélná 284
– – příčná 284
– tlumivky 105
– vinutí transformátoru 46
regulátor indukční 84
– ruční synchronního stroje 285
– samočinný synchronního stroje 286
rekuperace 373
relé plynové 25, 134
reostat derivační 368
Res-i-glas 120
reverzace indukčního motoru 212
– stejnosměrného motoru 370
rotor hladký 259, 263
– s vyjádřenými póly 259
rychleregulátor BBC 286
– Tirrill 287
rozběh indukční synchronního motoru 297
rozptyl indukčního motoru 196

rozteč pólová 160

Selsyn 300
schéma náhradní indukčního motoru 178, 183
– komutátorové 338
– – synchronního stroje 267, 271
– – transformátoru 37, 50
skluz 157
skupina Ilgnerova 382
– Leonardova 379
složka stejnosměrná zkratového proudu 282
spojky vyrovnávací 335
spojovač nakrátko 219, 244
spouštěč regulační 369
– rotorový 220
– stejnosměrného motoru 368
stabilita statická synchronního stroje 284
stroj stejnosměrný 324
– – unipolární 383
– synchronní 260
stroje stejnosměrné, druhy 354
stupně elektrické 160
svorkovnice indukčního motoru 211
svorky označení 62
– stejnosměrného stroje, označování 355
synchronoskop 294

Tlumivky, druhy 106
– zhášecí 107
tok magnetický rozptylový 44, 47
transformátor, druhy 21
– hliníkový 122
– ideální 33
– konstrukce 24
– napětí 96
– natáčivý 84, 85
–, označení 109
– proudu 98
– rozptylový 93
– říditelný 83
– sběračový 91
– skutečný 50
– úsporný 89

- transpozice 128
- třída přesnosti přístrojových transformátorů 99
- třídy izolace 19
- turboalternátor 261
 - , konstrukce 315
- turbomotor 261
- tvary točivých strojů 237
- tyč Roebelova 316

- Uzávěr nevýbušný 252

- Úhel hodinový 67, 77
- úhel zátěžný 269, 282

- Veličiny přepočítané 36, 43
- vinutí jednovrstvové transformátoru 126
 - kompenzační 346
 - košové 317
 - mnohovrstvové transformátoru 127
 - paralelní 332
 - překládané transformátoru 127
 - přepínatelné 225
 - rozběhové pomocné 231
 - – synchronního motoru 298
 - rozložené indukčního motoru 166
 - sériové 339
 - schodové 124
 - soustředné indukčního motoru 163, 165
- vinutí smyčkové 330, 332
 - transformátoru 122
 - – druhy 27
 - vlnové 330, 335
 - z fólií 124
 - zlomkové 168
- vodiče, označení 64
- voltmetr nulový 293
- vypínač odstředivý 233
- výkon průběžný tlumivky 104
 - vnitřní tlumivky 104
 - průběžný autotransformátoru 89
 - typový autotransformátoru 89
- výška jádra transformátoru 138

- Zapojení Barkhausenovo 403
 - Dahlanderovo 225
 - mnohofázové 76
 - Scottovo 75
 - T 74
 - V 74
- zatížení indukční alternátoru 267
 - nesouměrné transformátoru 70
- ztráty dodatečné transformátoru 57
 - měrné 42, 116
 - povrchové 180
 - pulsační 180
 - v železe 39, 180
- zapojení šestifázové 75

ING. RUDOLF MRAVEC

ELEKTRICKÉ STROJE A PŘÍSTROJE

I. Elektrické stroje

DT 621.313
621.314.2

Ze slovenského originálu Elektrické stroje a prístroje I, vydaného n. p. Alfa, vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry v Bratislave roku 1975, preložil doc. Ing. Vladimír Suchánek, CSc.

Vydalo SNTL – Nakladatelství technické literatury, n. p., Spálená 51, 113 02 Praha 1 v roce 1979 v řadě elektrotechnické literatury jako svou 8385. publikaci. Redakce elektrotechnické literatury. Odpovědný redaktor Ing. Josef Říha. Vazbu navrhl Metoděj Sychra. Technická redaktorka Jana Zehnulová. Ze sazby monofoto vytiskl ofsetem TISK, knižní výroba, n. p., Brno, závod 1. 432 stran, 255 obrázků, 5 tabulek. Typové číslo L26-C2-IV-31f/55381. Vydání první. Náklad 6 800 výtisků. 26,15 AA, 27,40 VA

05/34
Cena vázaného výtisku Kčs 28,—
507/23,856

Publikace je určena žákům středních průmyslových škol elektrotechnických studijního oboru Zařízení silnoprůdové elektrotechniky.

5552

04-506-79 Kčs 28,—