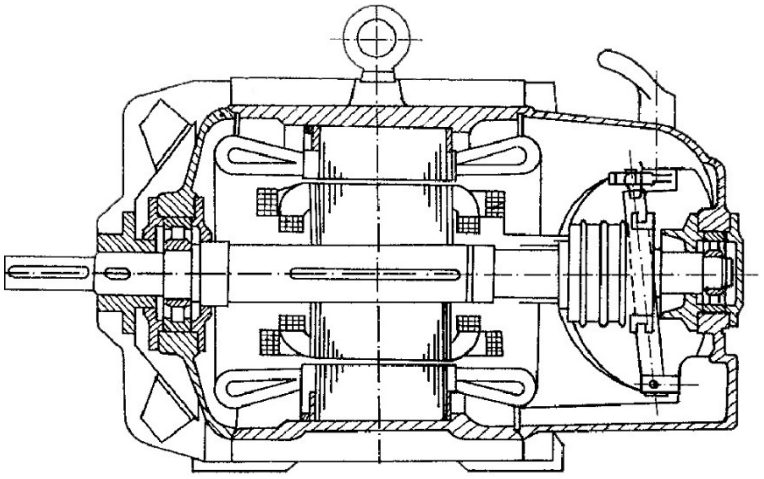
STŘEDNÍ ŠKOLA ELEKTROTECHNICKÁ, OSTRAVA, NA JÍZDÁRNĚ 30, p. o.

ELEKTRICKÉ STROJE



Ing. Petr VAVŘIŇÁK

2019

Učební texty pro žáky naší školy.

OBSAH

1. TRANSFORMÁTORY 3
1.1. Konstrukční uspořádání 3
1.2. Princip činnosti 5
1.3. Indukované napětí a převod transformátoru 6
1.4. Náhradní schéma a fázorový diagram transformátoru 6
1.5. Transformátor naprázdno 7
1.6. Transformátor nakrátko 8
1.7. Trojfázové transformátory 9
1.7.1. Zapojení trojfázových transformátorů 9
1.7.2. Hodinový úhel 10
1.7.3. Paralelní spolupráce transformátorů 10
1.8. Speciální transformátory 10
1.8.1. Autotransformátor 11
1.8.2. Měřící transformátory proudu a napětí 11
2. ASYNCHRONNÍ STROJE 12
2.1. Rozdělení asynchronních strojů 12
2.2. Konstrukční uspořádání asynchronních motorů 13
2.3. Vznik točivého magnetického pole 14
2.4. Princip činnosti asynchronních motorů 15
2.5. Momentová charakteristika asynchronního motoru 16
2.6. Asynchronní motory s kotvou kroužkovou 17
2.7. Asynchronní motory s kotvou nakrátko 18
2.8. Spouštění asynchronních motorů 20
2.9. Regulace otáček asynchronních motorů 21
2.10. Brzdění asynchronních motorů 23
2.11. Jednofázové asynchronní motory 24
3. SYNCHRONNÍ STROJE 28
3.1. Konstrukční uspořádání synchronních strojů 28
3.2. Synchronní alternátor 29
3.3. Princip synchronního alternátoru 29
3.4. Charakteristika naprázdno a náhradní schéma synchronního alternátoru 30
3.5. Zatěžovací a budící charakteristika synchronního stroje 30
3.6. Fázování a paralelní chod synchronních alternátorů 31
3.7. Synchronní motor 33
3.8. Synchronní kompenzátor 34
4. STEJNOSMĚRNÉ STROJE 35
4.1. Konstrukční uspořádání stejnosměrných strojů 35
4.2. Vinutí stejnosměrných strojů 36
4.3. Reakce kotvy a její potlačení 38
4.4. Komutace 39

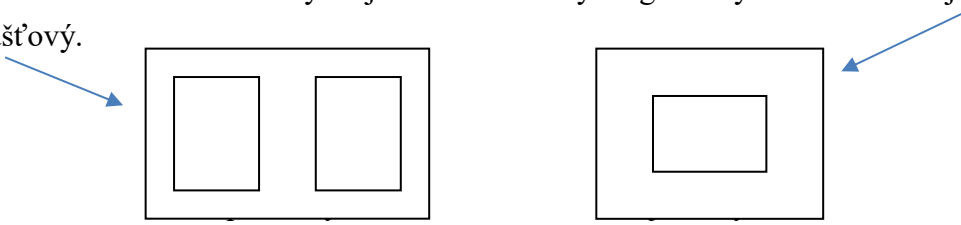
4.5. Dynama 42
4.5.1. Cize buzené dynamo 42
4.5.2. Derivační dynamo 43
4.5.3. Dynamo sériové 44
4.5.4. Dynamo se smíšeným buzením 44
4.6. Motory 45
4.6.1. Cize buzený motor 45
4.6.2. Derivační motor 53
4.6.3. Motor sériový 54
5. ZVLÁŠTNÍ TYPY MOTORŮ 59
5.1. Jednofázový sériový komutátorový motor 59
5.1.1. Konstrukční uspořádání 59
5.1.2. Princip činnosti 59
5.1.3. Vlastnosti 60
5.1.4. Použití 60
5.2. Trojfázové lineární motory 61
5.2.1. Konstrukční uspořádání 61
5.2.2. Princip činnosti 61
5.2.3. Vlastnosti 61
5.2.4. Použití 62
5.3. Motor s kotoučovým rotorem 62
5.3.1. Konstrukční uspořádání 62
5.3.2. Princip činnosti 62
5.3.3. Vlastnosti 63
5.3.4. Použití 63
5.4. Krokový motor s krokem 90° 63
5.4.1. Konstrukční uspořádání 63
5.4.2. Princip činnosti 63
5.5. Krokový motor s malým krokovým úhlem 64
5.5.1. Konstrukční uspořádání 64
5.5.2. Princip činnosti 64
5.5.3. Vlastnosti a použití 65
5.6. Elektronický motor 65
5.6.1. Konstrukční uspořádání 65
5.6.2. Princip činnosti 66
5.6.3. Použití 66

1. TRANSFORMÁTORY

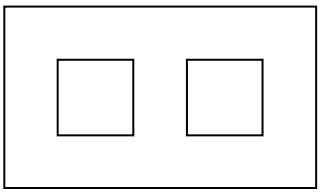
1.1. Konstrukční uspořádání

Základní části transformátoru jsou magnetický obvod tvořený vzájemně izolovanými transformátorovými plechy a vinutí z měděných nebo hliníkových izolovaných vodičů uložených na izolační kostře. Kromě těchto částí mají transformátory různé kryty sloužící jednak k izolaci a jednak k ochraně proti prostředí. Dále mohou mít transformátory různé druhy chlazení, popřípadě mohou mít podvozek či jiné mechanické upevnění.

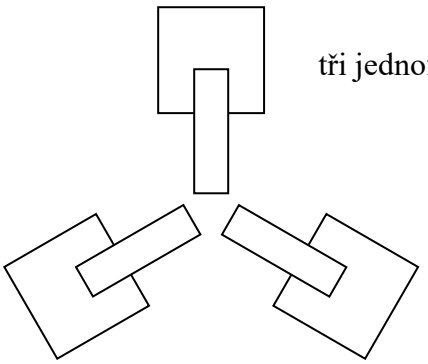
„Aktivní železo" transformátoru = magnetický obvod - skládá se z izolovaných plechů nejčastěji 0,35 nebo 0,5 mm bez vzduchové mezery (tím bude malý proud naprázdno). Jednofázové transformátory mají dva různé tvary magnetických obvodů a to jádrový nebo plášťový.



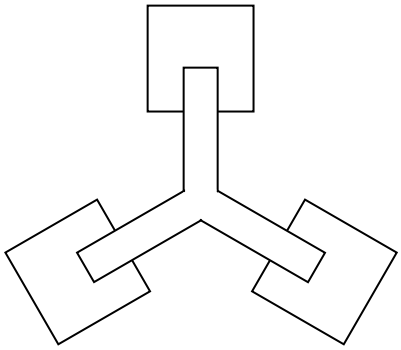
Trojfázové transformátory mají různé druhy obvodů: jádrový, plášťový (používá se výjimečně), popřípadě to může být soustava tří jednofázových obvodů posunutých prostorově o 120° a to buď zvlášť, nebo se společným středním sloupkem.



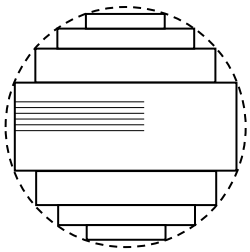
jádrový



tři jednofázové posunuté o 120°

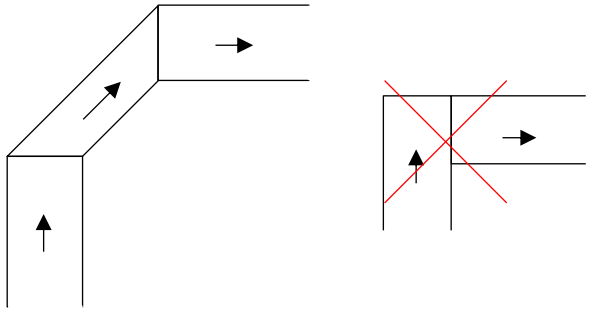


tři jednofázové
se společným sloupkem

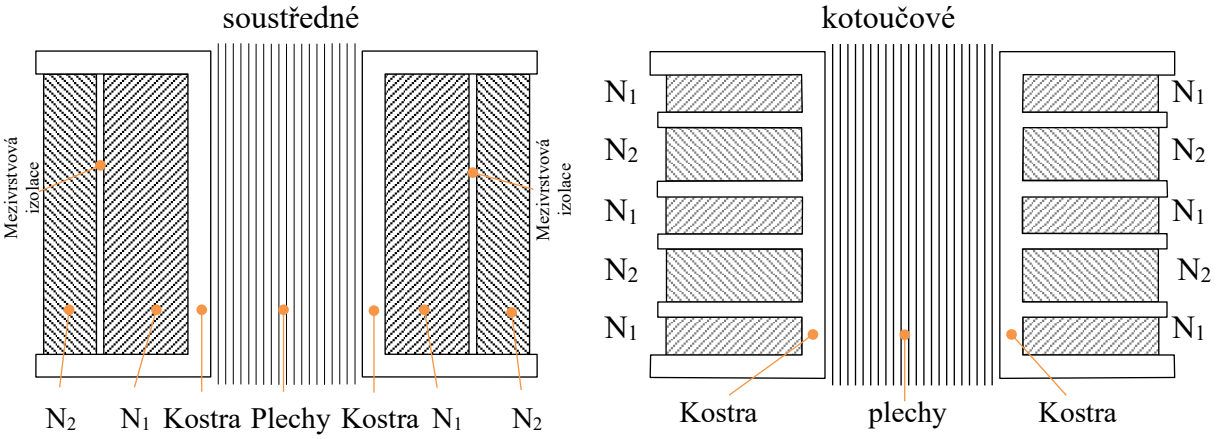


Jelikož u velkých transformátorů je jednodušší navinout cívku na kruhovou kostru (vodiče velkého průřezu se hůře ohýbají), proto se pro využití výkonu dělá magnetické jádro tzv. odstupňováním (výkon transformátoru je přímo úměrný druhé mocnině průřezu magnetického obvodu). U těchto velkých transformátorů se také využívají plechy válcované za studena orientovaně, které mají velice malý magnetický odpor ve směru válcování, ale výrazně větší magnetický odpor ve směru kolmém. Musíme proto skládat plechy tak, aby magnetický tok jimi procházel pouze

ve směru válcování (viz obrázek)



Vinutí transformátorů - Vyrábí se z izolovaných měděných nebo hliníkových (menší hmotnost i při větším průřezu) vodičů navinutých na kostrách z izolačního materiálu. U vinutí procházených velkými proudy se také mezi jednotlivé vrstvy vinutí vkládá papírová izolace. Jednofázové i trojfázové mají různé druhy uspořádání vinutí, které dělíme podle uspořádání cívek na soustředné (jednodušší na výrobu) a kotoučové (lepší chlazení) a podle uspořádání závitů na cívkové a polohové.



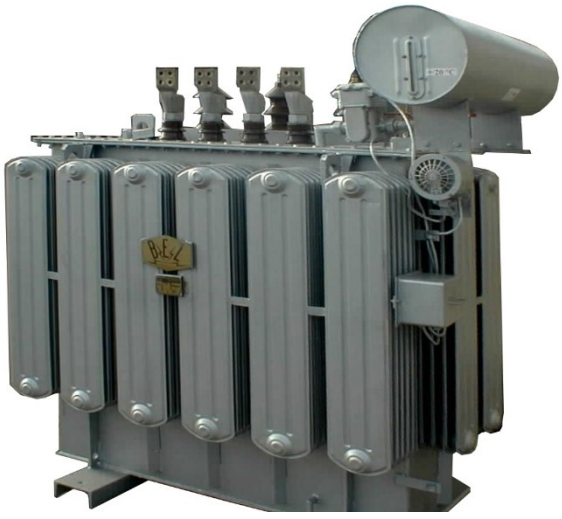
Chlazení transformátorů

Do 30 kVA výkonů transformátoru se transformátory vyrábějí jako vzduchové tedy chlazené jen okolním vzduchem.

Do 20 MVA se transformátory chladí přirozeným chlazením v oleji. Nádoby jsou hladké.

Do 25 MVA se chladící plocha zvětšuje zvlněním.

Do 30 MVA se chladící plocha zvětšuje trubkami nebo radiátory přivařenými na nádobě s transformátorem.

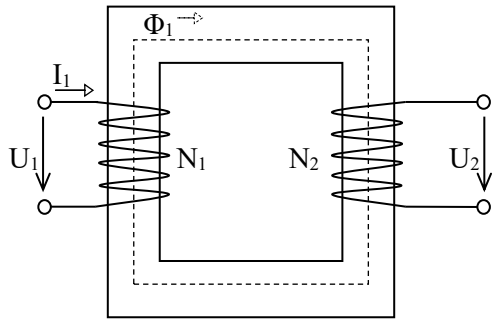


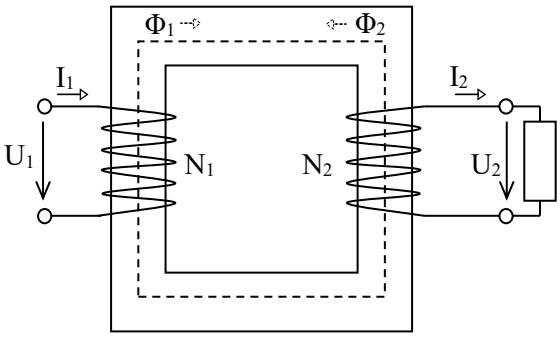
Do 60 MVA se zvyšuje chlazení ofukováním trubek nebo radiátorů.

Od 60 MVA chladíme nuceným oběhem oleje, tedy horký olej odvádíme do chladiče a studený přivádíme zpět do nádoby.

1.2. Princip činnosti

Transformátor má na magnetickém obvodu navinuty minimálně dvě cívky, primární cívka se připojuje na síť a odebírá z ní střídavý příkon. Cívkou začne procházet proud I_1 a tím vybudí střídavý magnetický tok Φ_1 v magnetickém obvodě. Tento magnetický tok prochází oběma cívkami a indukuje do nich napětí. Napětí indukované do primární cívky je úbytkem napětí v primárním obvodě a napětí indukované do sekundární cívky je zdrojem napětí v sekundárním obvodě.



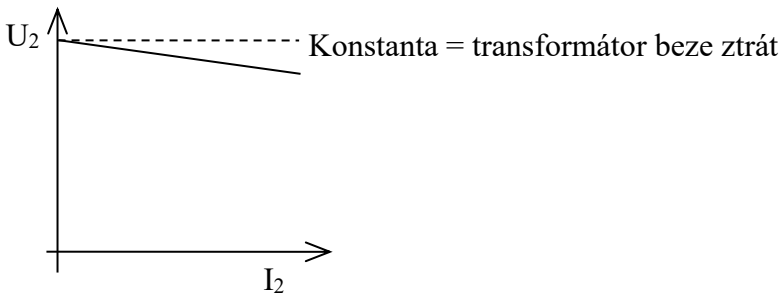


Po připojení spotřebiče začne sekundárním obvodem procházet proud I_2 a transformátor dodává do spotřebiče výkon. Proud I_2, ale budí magnetický tok Φ_2, který dle Lenzova zákona působí proti toku Φ_1. Výsledný tok Φ ($\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$) musí však být vždy natolik velký, aby do primární cívky indukoval stále stejné napětí, které je v rovnováze s napětím zdroje U_1 ($U_1 = U_i + R_1 \cdot I_1 + X_{1\sigma} \cdot I_1$ viz kapitola náhradní schéma - rovnice *R 2.4.1*).

Začne-li procházet nebo obecně zvětší-li se proud I_2 v sekundárním obvodě, zvětší se tím i tok Φ_2, tím se zmenší výsledný tok Φ a zmenší se též indukované napětí. Došlo by k rozvážení rovnice *R 2.4.1*, což nelze, a proto se musí zvětšit primární proud I_1. Zvýšením proudu I_1 se zvýší i tok Φ_1 jím buzený a výsledný tok Φ se vrátí na původní hodnotu. Platí tedy $\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$ = konstanta, tzn., že prostřednictvím magnetického toku se přenesl požadovaný větší výkon ze strany sekundární na stranu primární. Obdobně to platí i při zmenšení proudu I_2. Zmenší-li se proud I_2, zmenší se i magnetický tok Φ_2, čímž se zvětší výsledný tok Φ. Indukované napětí se též zvětší (opět by došlo k rozvážení rovnice *R 2.4.1*) a proto se musí proud I_1 zmenšit, čímž se zmenší i tok Φ_1 a výsledný tok Φ se opět vrátí na původní hodnotu.

Zatěžovací charakteristika transformátoru

Sekundární napětí se se zatížením zmenšuje, protože část indukovaného napětí ubývá na vnitřní impedanci transformátoru.



1.3. Indukované napětí a převod transformátoru

Okamžitá hodnota indukovaného napětí je dána indukčním zákonem $u_i = N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$, kde $\frac{d\Phi}{dt}$ znamená změnu toku za element času (nekonečně krátký časový úsek). Mění-li se magnetický tok sinusově tedy $\Phi = \Phi_{max} \cdot \sin \omega t$ pak po dosazení a vyřešení diferenciální rovnice dostaneme vztah pro okamžitou hodnotu indukovaného napětí $u_i = \omega \cdot N \cdot \Phi_{max} \cdot \cos \omega t$. Maximální hodnota indukovaného napětí (cos ωt = 1) je $U_{i_{max}} = \omega \cdot N \cdot \Phi_{max}$ a jelikož $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ a $U_{i_{max}} = \sqrt{2} \cdot U_i$, dostáváme vztah pro efektivní hodnotu indukovaného napětí:

$$\mathbf{U_i = 4,44 \cdot \Phi \cdot f \cdot N}.$$

U ideálního (bezeztrátového) transformátoru můžeme říct, že $U_1 = U_{i1} = 4{,}44 \cdot \Phi \cdot f \cdot N_1$ a $U_2 = U_{i2} = 4{,}44 \cdot \Phi \cdot f \cdot N_2$.

Dělením obou rovnic dostáváme vztah pro převod transformátoru: $p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$. Využijeme-li vztahů pro výpočet příkonu a výkonu transformátoru $S_1 = U_1 \cdot I_1$ a $S_2 = U_2 \cdot I_2$ a jelikož u bezeztrátového transformátoru je $S_1 = S_2$ můžeme vztah pro převod transformátoru upravit na tvar:

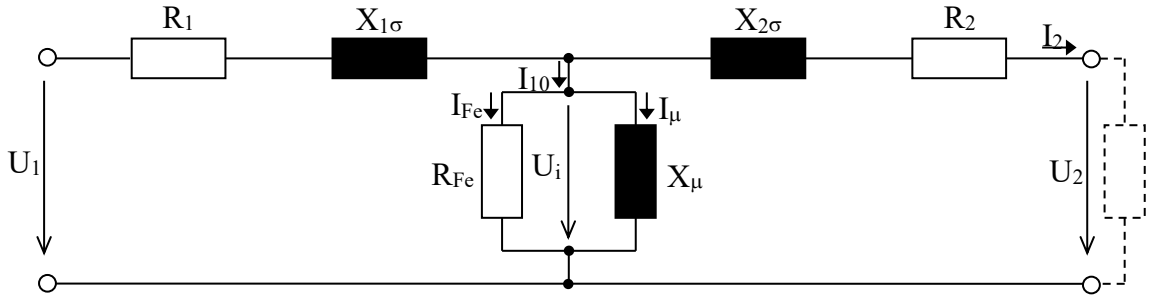
$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}.$$

Nebo pro reálné transformátory na tvar:

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \doteq \frac{I_2}{I_1}.$$

1.4. Náhradní schéma a fázorový diagram transformátoru

Náhradní schéma transformátoru je poskládáno z podélné větve složené z činných odporů primárního a sekundárního vinutí (R_1 a R_2) a induktivních reaktancí obou cívek procházených rozptylovým tokem ($X_{1\sigma}$, $X_{2\sigma}$) a z příčné větve složené z magnetického odporu magnetického obvodu (R_{Fe}) a reaktance magnetického obvodu (X_μ).



$X_{1\sigma}$ - rozptylová reaktance primární cívky dané rozptylovým magnetickým tokem $\Phi_{1\sigma}$

$X_{2\sigma}$ - rozptylová reaktance sekundární cívky dané rozptylovým magnetickým tokem $\Phi_{2\sigma}$

R_1, R_2 - činné odpory cívek

R_{Fe} - odpor magnetického obvodu je dán tepelnými ztrátami

X_μ - reaktance magnetického obvodu

Pro náhradní schéma můžeme napsat rovnice dle I. a II. Kirchhoffova zákona:

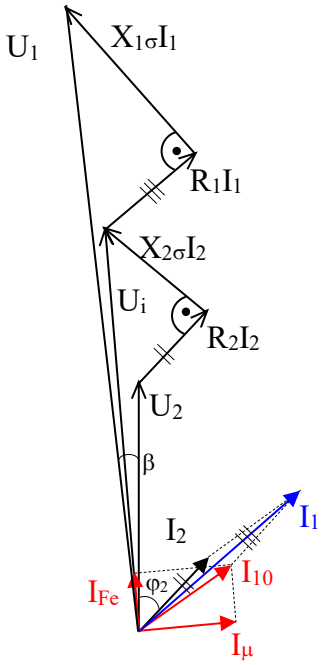
$R_1 \cdot I_1 + X_{1\sigma} \cdot I_1 + U_i = U_1$ *R 2.4.1*

$R_2 \cdot I_2 + X_{2\sigma} \cdot I_2 + U_i = U_2$ *R 2.4.2*

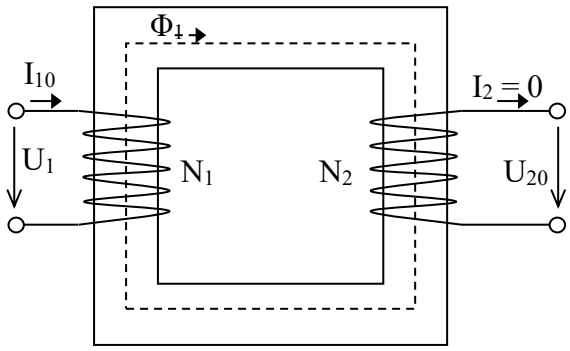
$I_{10} = I_{Fe} + I_\mu$ *R 2.4.3*

$I_1 = I_{10} + I_2$ *R 2.4.4*

Při konstrukci fázového diagramu vycházíme z hodnot naměřených na sekundární straně (U_2, I_2 a φ_2). K napětí U_2 přičteme obrácené hodnoty vektorů odpovídajících úbytků na odporu R_2 (je ve fázi s proudem I_2) a na rozptylové reaktanci $X_{2\sigma}$ (je o 90° posunut před proud I_2). Koncový bod spojíme s počátkem, čímž získáme vektor indukovaného napětí U_i. Dále musíme nakreslit činnou a jalovou složku magnetizačního proudu I_{10}, kde činná složka I_{Fe} je ve fázi s indukovaným napětím U_i a jalová složka I_μ se za ním zpožďuje o 90°. Vektorový součet těchto složek je proud na prázdno I_{10}. Sečteme-li vektorově proud I_{10} s proudem I_2 získáme proud I_1. Nyní můžeme k fázoru indukovaného napětí přičíst úbytek na odporu R_1 (ve fázi s I_1) a úbytek na rozptylové reaktanci $X_{1\sigma}$ (předbíhá proud I_1 o 90°). Spojením počátku a konce úbytku na $X_{1\sigma}$ dostáváme napětí U_1. Úhel β představuje fázový posun sekundárního napětí vůči primárnímu síťovému napětí.



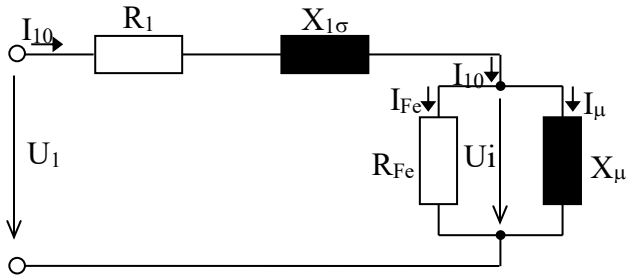
1.5. Transformátor naprázdno



Transformátor ve stavu naprázdno má rozpojené sekundární svorky a sekundárním vinutím tedy neprochází žádný proud. Vstupním vinutím prochází proud I_{10}, který je velice malý a slouží k vytvoření magnetického toku v jádře a ke krytí ztrát v magnetickém obvodu. Skládá se tedy ze dvou částí: z proudu magnetizačního I_μ (fázově posunutého o 90°za U_i), který vytváří magnetické pole a z proudu na krytí tepelných ztrát v železe I_{Fe} (ve fázi s napětím U_i).

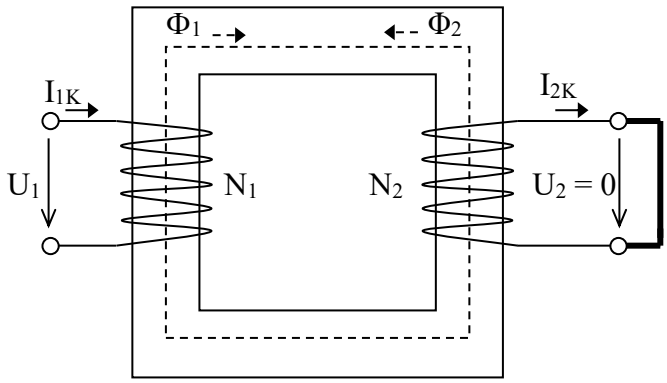
Voltampérová charakteristika transformátoru naprázdno odpovídá magnetizační charakteristice. Ztráty v primárním vinutí jsou díky malému proudu velice malé, a proto je zanedbáváme, veškeré ztráty ve stavu naprázdno tedy považujeme za ztráty v železe.

Měřením naprázdno (měříme napětí U_{10}, proud I_{10} a výkon P_{10} na primární straně) a výpočtem z naměřených hodnot určíme parametry dvou prvků náhradního schéma R_{Fe} a X_μ ze vztahů: $R_{Fe} = \frac{U_{10}}{I_{10}} \cdot \cos\varphi_{10}$, $X_\mu = \frac{U_{10}}{I_{10}} \cdot \sin\varphi_{10}$ (úbytek napětí na R_1 a $X_{1\sigma}$ můžeme díky malému proudu I_{10} zanedbat).



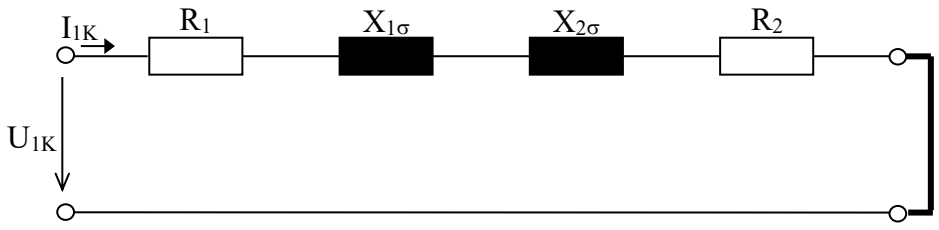
1.6. Transformátor nakrátko

Transformátor ve stavu nakrátko má sekundární svorky propojeny bezodporovou propojkou (tedy napětí $U_2 = 0$) a sekundárním obvodem prochází obrovský proud, který natolik zahřívá transformátor, že by mohlo dojít k jeho zničení. Musí tedy dojít k reakci ochran a transformátor musí být odpojen.



Při měření stavu nakrátko jsou výstupní svorky také spojeny do krátka a proto musíme snížit napětí na primární cívce tak, aby sekundárním vinutím procházel právě jmenovitý proud, který nezpůsobí zničení transformátoru. Sníženému primárnímu napětí říkáme napětí nakrátko a často jej vyjadřujeme v procentech jmenovitého napětí. $u_{1K} = \frac{U_{1K}}{U_{1N}} \cdot 100\%$. Procentní napětí nakrátko bývá 4 až 10%.

Náhradní schéma transformátoru ve stavu nakrátko kreslíme bez paralelní větve R_{Fe}, X_μ, neboť impedance zkratu je mnohonásobně menší a tedy téměř celý proud bude procházet zkratem.



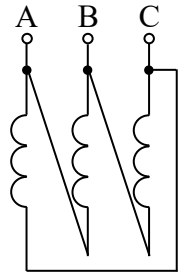
Měřením nakrátko (měříme napětí U_{1K}, proud I_{1K} a výkon P_{1K} na primární straně) jsme zjistili parametry R_1, R_2, $X_{1\sigma}$, $X_{2\sigma}$

($R_1 = R_2' = \frac{1}{2}\frac{U_{1K}}{I_{1K}} \cdot \cos\varphi_{1K}$, $X_{1\sigma} = X_{2\sigma}' = \frac{1}{2}\frac{U_{1K}}{I_{1K}} \cdot \sin\varphi_{1K}$ - hodnoty s čarou jsou přepočteny na primární stranu).

1.7. Trojfázové transformátory

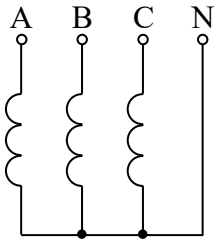
1.7.1. Zapojení trojfázových transformátorů

Vinutí trojfázových transformátorů můžeme spojovat do trojúhelníku, hvězdy nebo lomené hvězdy. Svorky transformátoru popisujeme na straně vyššího napětí velkými písmeny na straně nižšího napětí pak písmeny malými.



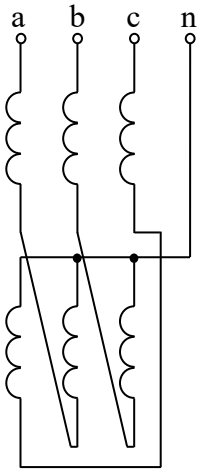
Zapojení transformátoru do trojúhelníku (D, d,△)

Zapojení do trojúhelníku dostaneme tak, že konec (začátek) cívky na jednom sloupku spojíme se začátkem (koncem) cívky na následujícím (předchozím) sloupku.



Zapojení transformátoru do hvězdy (Y, y, ⅄)

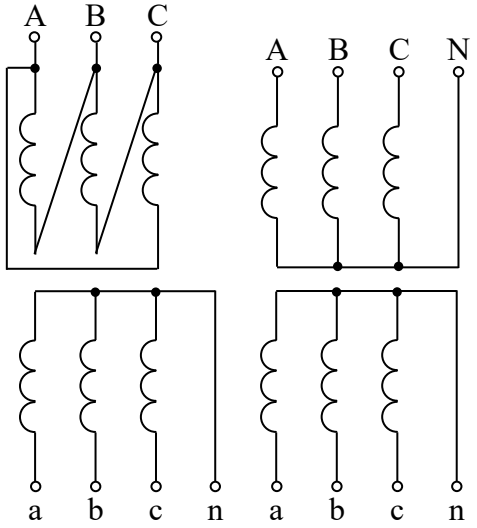
Zapojení do hvězdy znamená, že začátky nebo konce vinutí spojíme do uzlu a druhé vývody vinutí připojíme ke svorkám (často se ke svorce N vyvede i spojený uzel).



Zapojení transformátoru do lomené hvězdy (z, ⅄⅄)

Pro zapojení transformátoru do lomené hvězdy (jen na sekundární straně) je potřeba více mědi × hliníku (cca o jednu třetinu), neboť každá fáze se skládá ze dvou cívek navinutých na sousedních sloupcích. Zapojení do lomené hvězdy vznikne tak, že začátky (konce) druhých polovin cívek spojíme do uzlu a konce (začátky) spojíme se začátky (konci) prvních polovin cívek umístěných na předchozích (následujících) sloupcích. Konce (začátky) pak vyvedeme na svorkovnici. Toto zapojení se používá tam, kde je velmi nesouměrný odběr, protože se nesouměrný odběr v jedné fázi sekundární strany přenese na dvě fáze primární strany.

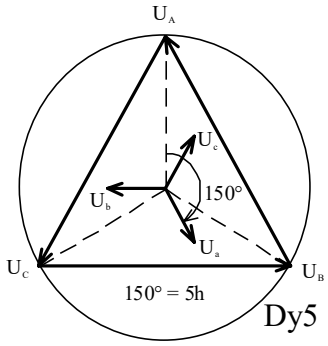
Kompletní zapojení transformátoru se pak skládá ze zapojení primárních cívek a ze zapojení cívek sekundárních. Kompletní zapojení transformátorů se poté označuje kombinací písmen zapojení (velké písmeno na straně vyššího napětí, malé na straně nižšího napětí) a čísla vyjadřujícího hodinový úhel (viz dále)



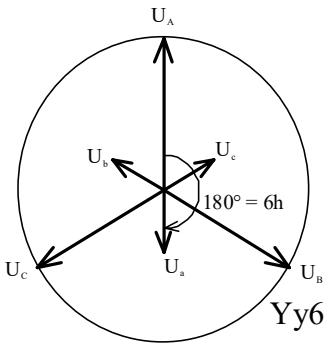
Zapojení Dy5 Zapojení Yy6

1.7.2. Hodinový úhel

Je to fázový posun mezi primárním a sekundárním fázorem napětí téže fáze měřený ve směru hodinových ručiček od primárního k sekundárnímu vyjádřený v hodinách (1 hodina = 30°).

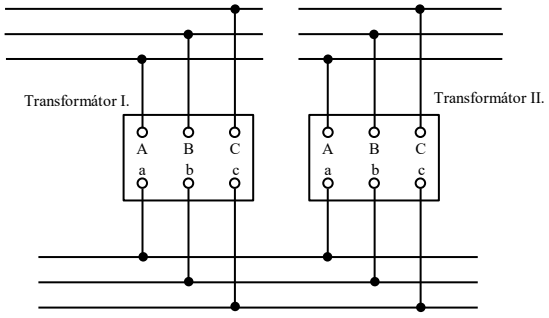


Dy5



Yy6

1.7.3. Paralelní spolupráce transformátorů



Nestačí-li dodávat výkon jeden transformátor, připojujeme k němu další transformátor paralelně. Transformátory pracují paralelně, jsou-li navzájem propojeny odpovídající svorky (alespoň na sekundární straně – primární strany mohou být napájeny z jiných zdrojů).

Paralelně spolupracující transformátory musí splňovat tyto podmínky:

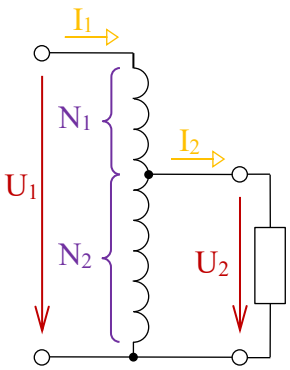
1) jmenovitá napětí propojených vinutí obou transformátorů musí být stejná (při nestejném napětí by vznikaly velké vyrovnávací proudy),
2) musí mít stejné procentní napětí nakrátko (při zátěži by napětí na výstupu transformátoru s vyšším procentním napětím nakrátko kleslo více než u transformátoru s nižším procentním napětím nakrátko a při nestejném napětí by opět vznikaly velké vyrovnávací proudy),
3) musí mít stejný hodinový úhel (můžou mít různé zapojení), aby výstupní napětí transformátorů bylo ve fázi (sinusoidy okamžitých hodnot napětí musí splývat, jinak by opět vznikaly velké vyrovnávací proudy),
4) měli by mít přibližně stejný výkon.

1.8. Speciální transformátory

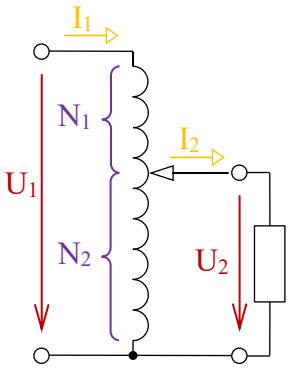
Mezi tyto transformátory patří například autotranformátor, nebo měřící transformátory proudu a napětí.

1.8.1. Autotransformátor

Jedná se o transformátor s pouze jedním vinutím rozděleným na dvě části spojené do série.



Přičemž část s N_2 závity je společná pro primární i sekundární stranu a prochází jí proud odpovídající rozdílu $I_1 - I_2$. Převod transformátoru je pak dán vztahem: $p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1 + N_2}{N_2}$.

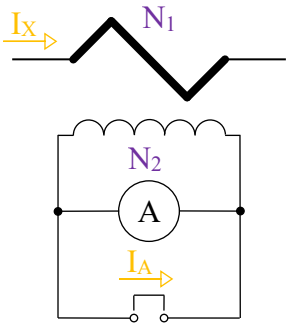


Tyto transformátory se často konstruují jako regulační tedy s proměnnou hodnotou výstupního napětí. Regulace napětí je umožněna vodivým jezdcem pohybujícím se po odizolované části vinutí. Napětí se mění skokově vždy o hodnotu odpovídající jednomu závitu cívky autotransformátoru.

Výhoda autotransformátoru spočívá v menší spotřebě mědi na vinutí, jeho nevýhodou je pak galvanické neoddělení vstupního a výstupního obvodu. Mohlo by se tedy stát, že při přerušení vinutí ve společné části (N_2) se objeví na výstupní straně plné vstupní napětí.

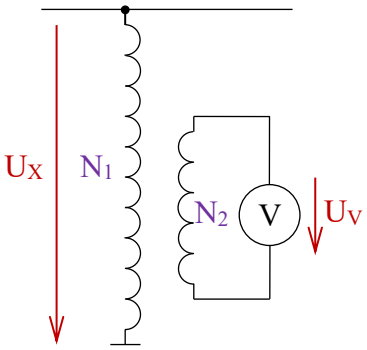
1.8.2. Měřící transformátory proudu a napětí

Slouží ke změně rozsahu ampérmetru nebo voltmetru. Měřící transformátor proudu převádí měřený proud na proud maximálně 5 A (popř. 1 A). Primární cívka má často jen jeden závit



nebo dokonce jen magnetickým obvodem prochází vodič tyčového průřezu (má tedy jen ½ závitu). Sekundární cívka je doplněna zkratovačem svorek, který se rozpojí až po připojení ampérmetru (jelikož napěťový převod a převod proudový jsou obrácené bylo by při nezatíženém transformátoru na výstupu obrovské napětí - $\frac{U_1}{U_2} \doteq \frac{I_2}{I_1} \Rightarrow U_2 = \frac{U_1 \cdot I_1}{I_2}$ – máme-li například transformátor 100/5 A na 12,7 kV (22 kV síť), bude $U_2 = 254\,000$ V) .

Měřící transformátor napětí převádí měřené napětí na napětí maximálně 100 V (popřípadě $100/\sqrt{3}$ V). Primární strana má být uzemněna.



Hodnoty naměřené měřícími přístroji se pro zjištění velikosti měřené veličiny musí vynásobit převodem měřícího transformátoru ($I_X = I_A \cdot p_A$; $U_X = U_V \cdot p_V$).

2. ASYNCHRONNÍ STROJE

Všechny asynchronní (indukční) stroje pracují tak, že jejich rotor má jiné otáčky než točivé magnetické pole vytvořené vinutím uloženým v jejich statoru. Čím větší je zatížení asynchronního stroje, tím jsou jeho otáčky menší. Rozdíl mezi otáčkami točivého magnetického pole statoru a otáčkami rotoru se vyjadřuje tzv. skluzem, který je dán vztahem

$s = \frac{n_s - n}{n_s}$ [-], kde n_s jsou synchronní otáčky točivého magnetického pole a n jsou otáčky rotoru stroje. Často se pak skluz udává v procentech synchronních otáček

$s = \frac{n_s - n}{n_s}.100$ [%].

Skluz se pohybuje od 1% (u velkých strojů) až do 15% (u strojů malých). V praxi se nejčastěji setkáme se stroji se skluzem okolo 5%.

2.1. Rozdělení asynchronních strojů

Asynchronní stroje se dělí podle několika hledisek:

I.) Podle způsobu práce na:

a) asynchronní motor - v něm se přiváděná elektrická energie mění na energii mechanickou, která přemáhá odpor poháněného zařízení
b) asynchronní alternátor - v něm se mechanická energie přiváděná na rotor mění na elektrickou energii odebíranou ze statorového vinutí
c) indukční brzda - využívá k brzdění točivého momentu vznikajícího otáčením rotoru proti směru, kterým by se točil působením elektromagnetických sil (používá se především v laboratořích k měření zatěžovacího momentu)
d) asynchronní měnič kmitočtu - využívá změn kmitočtu proudu, indukovaného v otáčejícím se rotoru (dnes se již nevyužívá)

II.) Podle uspořádáni statorového vinutí na:

a) jednofázový (s pomocnou rozběhovou fází)
b) trojfázový

III.) Podle provedení rotorového vinuti na:

a) stroje kroužkové - mají vsypávaná (drátová) vinutí, jejichž jedny konce jsou spojeny do uzlu a druhé jsou vyvedeny na kroužky, které jsou přes kartáče spojeny s rotorovým spouštěčem
b) stroje nakrátko - mají rotorové vinutí trvale spojené čelními kruhy nakrátko

2.2. Konstrukční uspořádání asynchronních motorů

Asynchronní motor je nejpoužívanější asynchronní stroj a vlastně nejpoužívanější elektrický točivý stroj vůbec, protože je nejjednodušší a tím i nejlevnější.

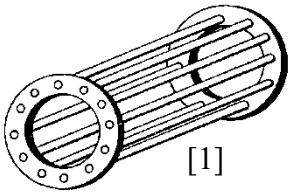
Asynchronní motor se skládá ze dvou částí, tzv. statoru a rotoru. Stator je tvořen

magnetickým obvodem s vloženým vinutím. Magnetický obvod je složen ze statorových plechů vzájemně izolovaných (keramické vrstvičky, oxidy nebo laky) a vkládá se do odlité nebo svařované kostry, často opatřené z vnější strany žebrováním pro lepší odvod ztrátového tepla. Na vnitřním obvodě plechů jsou vylisovány drážky, které mají různý profil (plocha mezi dvěma drážkami se nazývá zub). Do statorových drážek se ukládá obvykle trojfázové vinutí (jednofázové stroje jsou dále v samostatné kapitole).

V dutině statoru, oddělený vzduchovou mezerou, se pohybuje rotor tvořený hřídelí a na ní nalisovaného svazku rotorových plechů s vinutím. Magnetický obvod rotoru je tedy opět složen ze vzájemně izolovaných plechů s drážkami na vnějším obvodu, pro uložení vinutí. Vinutí rotoru se dá rozdělit do dvou skupin na rotory s vinutím nakrátko a rotory kroužkové (měděné vinutí je na jedné straně vyvedeno na tři kroužky).

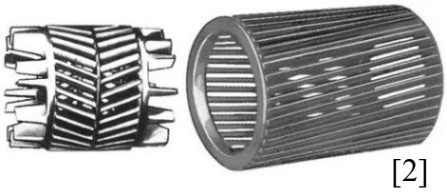
Kroužkové rotory mají rotorové trojfázové vinutí navinuto z měděného vodiče, které je spojeno na jednom konci do hvězdy a druhé konce jsou vyvedeny na tři kroužky z vodivého dobře kluzného materiálu (mosaz, bronz), které jsou izolovaně upevněny na hřídeli. Na kroužky dosedají uhlíkové kartáče umístěné v držácích upevněných ve statoru a spojují je se svorkami rotorové svorkovnice. Součástí těchto motorů je též často odklápěč kartáčů, který po rozběhu motoru a následném zkratováni kroužků odklopí kartáče a zabrání jejich opotřebování a ztrátám třením.

Motory s kotvou nakrátko mají rotorové drážky zaplněny vinutím z tyčí. Toto vinuti je buď



[1]

s jednoduchou klecí odlitou z hliníku, tzv. vibračním litím (to se provádí tak, že poskládaný a stažený rotorový svazek se zahřeje a vloží do formy, forma se upne na vibrující pružnou podložku a pod tlakem se „zaleje“ hliníkem; protože forma vibruje, hliník dokonale zateče do všech míst; jelikož tyče musí být spojeny dokrátka vytvoříme při lití na obou čelech zkratovací kruhy (jeden z nich často tvarujeme jako lopatky ventilátoru) nebo s klecí dvojitou (jedna slouží k rozběhu a druhá k běhu motoru) nebo s tzv. vírovou klecí (opět nejčastěji odlitou z hliníku). Směr tyčí je buď rovnoběžně s osou hřídele, nebo jsou sešikmeny (větší záběrný moment).

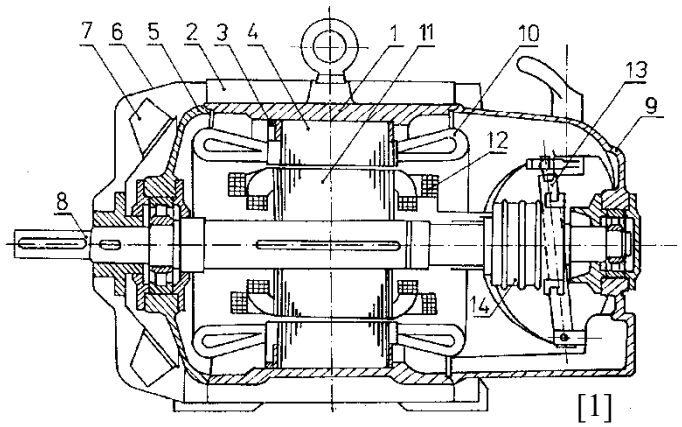


[2]

Základním požadavkem na konstrukci asynchronního motoru po mechanické stránce je dostatečná tuhost, aby vzduchová mezera δ mohla být co nejmenší. Malá vzduchová mezera způsobuje, že motor pracuje s dobrým účiníkem, který je vždy indukčního charakteru. U drobných asynchronních motorů bývá vzduchová mezera kolem 0,2 mm, u velkých až 3 mm. Tento požadavek je zajišťován pomocí vík obsahujících ložiska, kterými je rotor držen ve statoru.

Asynchronní motor má tedy vinutí ve statoru i v rotoru. Elektrická energie se však přivádí pouze do vinutí statoru, ve vinutí rotoru se napětí indukuje (asynchronní stroje se proto někdy nazývají stroje indukční). Rotor se v tomto případě nazývá též kotva (obecně se u točivých strojů nazývá kotvou ta část, ve které se indukuje napětí, takže kotvou může být nejen rotor, ale i stator). Asynchronní stroje tedy někdy nazýváme stroje s kotvou nakrátko nebo stroje s kotvou kroužkovou.

Konstrukce stroje je ovlivněna i krytím stroje (IP XX XX). Tvarem stroje, jeho upevněním a spojením s poháněným zařízením (IM X XX X). Z motoru je též nutné odvádět ztrátové teplo (IC X XX). Dnes se nejčastěji vyrábějí trojfázové motory v tzv. uzavřeném provedení, které vyhovuje i pro prašné a nečisté prostředí.



[1]

Uzavřený asynchronní kroužkový motor s povrchovým žebrovým chlazením

1 kostra, 2 žebra kostry, 3 zajišťovací péra statoru, 4 statorové plechy, 5 zadní ložiskový štít (u řemenice), 6 kryt větráku, 7 větrák, 8 hřídel, 9 přední ložiskový štít, 10 statorové vinuti, 11 rotorové plechy, 12 rotorové vinutí, 13 spojovač kroužků, 14 sběrací kroužky

Každý uzavřený motor musí mít na nejspodnějším místě dýchací otvor o průměru 12 až 20 mm pro odpad vody, která se ve stroji sráží.

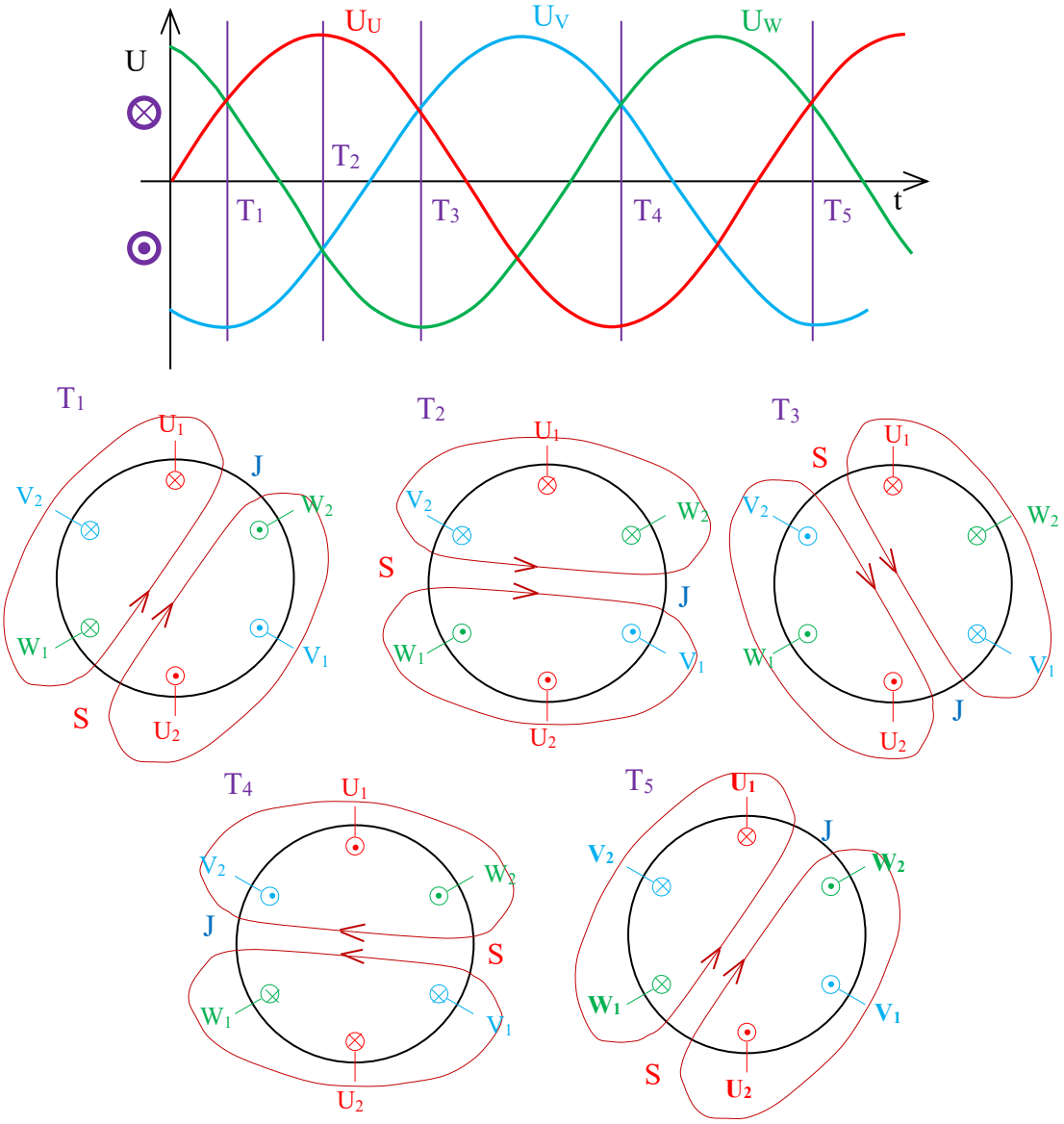
Asynchronní motor lze snadno provedením přizpůsobit nejrůznějším požadavkům na pohon. Jiné provedení mají motory pro pohon obráběcích strojů, jiné vestavné motory, brzdové motory, motory čerpadel apod.

2.3. Vznik točivého magnetického pole

Vznik točivého magnetického pole si můžeme vysvětlit dle následujícího obrázku. Představíme-li si zjednodušeně stator jako kružnici s trojfázovým vinutím, jehož každá cívka má pro jednoduchost jeden závit a jsou vůči sobě pootočeny vždy o 120°. Začátek cívky je označen indexem 1, konec indexem 2. Zároveň jsem zvolil, že je-li na začátek cívky

přivedena kladná půlvlna, teče proud do cívky ⊗ a je-li přivedena záporná půlvlna teče proud z cívky ⊙. Druhou stranou cívky se tedy proud vrací (má opačný směr).

Nakreslíme-li si stav magnetického pole v čase T_1 vidíme, třemi vodiči teče proud dovnitř a třemi ven, proto můžeme dokreslit magnetické pole dle pravidla pravé ruky – uchopíme-li cívku do pravé ruky tak, že prsty ukazují směr proudu, oddálený palec nám ukáže severní pól magnetického pole. Toto pole je popsáno magnetickými indukčními čarami, které směřují uvnitř cívky vždy od severu k jihu. Nakreslíme-li pak totéž v dalších časových okamžicích, vidíme, že se magnetické pole točí!



2.4. Princip činnosti asynchronních motorů

Ve statorových drážkách je navinuto trojfázové vinutí. Připojíme-li toto vinutí na zdroj trojfázového napětí, začne procházet proud, který vybudí v magnetickém obvodu statoru točivé magnetické pole. Otáčky tohoto pole nazýváme synchronní a jsou dány vztahem

$n_s = \frac{60 \cdot f}{p}$ [min^{-1}], kde f je kmitočet napájecího proudu a p je počet pólových dvojic.

Toto točivé magnetické pole statoru indukuje napětí do vinutí rotoru. Vinutím rotoru začne procházet značný proud, a jelikož na vodič s proudem v magnetickém poli působí síla vyvolávající točivý moment, rotor se roztočí stejným směrem, jakým se točí magnetické pole statoru. Přičemž otáčky rotoru jsou sníženy proti synchronním otáčkám o tzv. skluzové otáčky $n = n_s \cdot (1 - s)$.

2.5. Momentová charakteristika asynchronního motoru

Momentová charakteristika je závislost momentu na skluzu M = f (s) a vychází z tzv.

Klossova vztahu: $M = 2 \cdot \frac{M_{MAX}}{\frac{s_{zv}}{s} + \frac{s}{s_{zv}}}$, kde s_{zv} je tzv. skluz zvratu, tedy skluz při maximálním

momentu M_{MAX}.

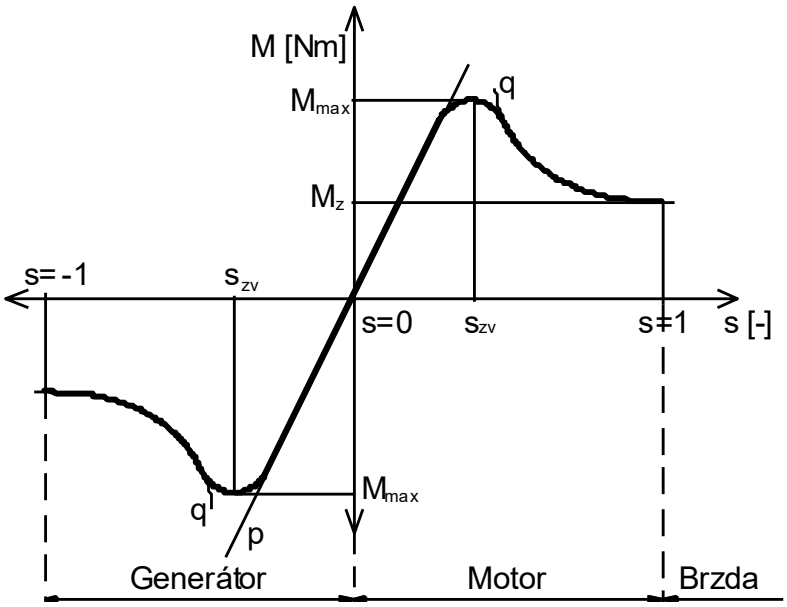
Pro grafické vyjádření momentové charakteristiky vycházíme ze dvou možností:

a) $s << s_{zv}$, pak poměr $\frac{s}{s_{zv}}$ můžeme zanedbat a Klossův vztah se zjednoduší na tvar:

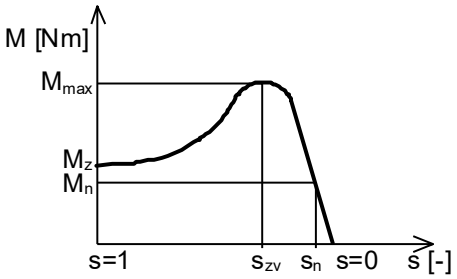
$M = 2 \cdot \frac{M_{MAX} \cdot s}{s_{zv}}$, což je rovnice přímky *p*.

b) $s_{zv} << s$, pak můžeme zanedbat $\frac{s_{zv}}{s}$ a dostáváme rovnici hyperboly *q* ve tvaru:

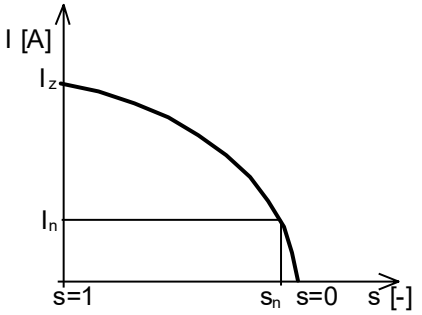
$M = 2 \cdot \frac{M_{MAX} \cdot s_{zv}}{s}$



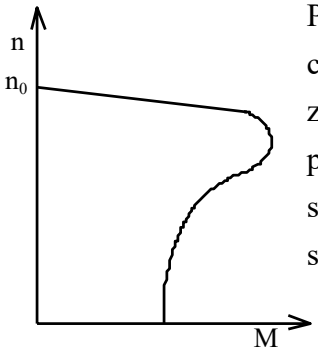
Momentovou charakteristiku motoru často kreslíme s obrácenou osou skluzu, tedy skluz s = 1 ($n = n_s$) je v průsečíku s osou momentu.



Motor se rozbíhá se záběrným momentem M_z, poté moment vzrůstá, protože vzrůstá činná složka proudu. Ta vzrůstá z důvodu převažujícího vlivu zvětšování účiníku a zmenšování impedance. Moment se zvětšuje až do hodnoty maximálního momentu M_{max}, který nastává při tzv. skluzu zvratu a pak klesá, neboť převažuje vliv zmenšování celého indukovaného proudu.

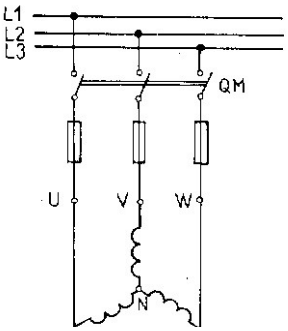


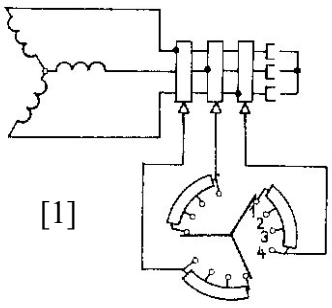
Proudová charakteristika ukazuje, že záběrný proud je až sedmkrát větší než proud jmenovitý a po rozběhu klesá.



Pro porovnání momentové charakteristiky motoru se zatěžovací charakteristikou poháněného zařízení kreslíme momentovou charakteristiku s vyměněnými osami (osa otáček ve směru osy y a osa momentu ve směru osy x).

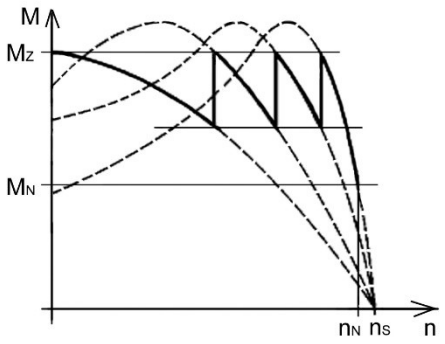
2.6. Asynchronní motory s kotvou kroužkovou

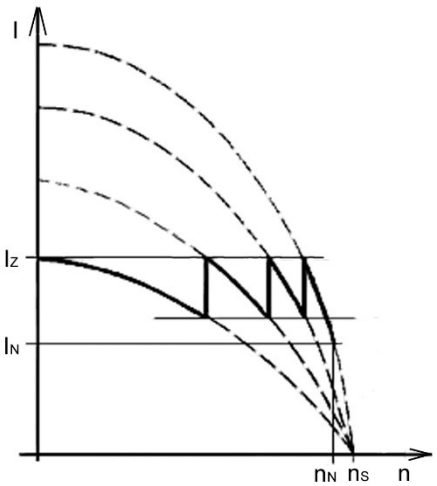




[1]

Ze schéma zapojení kroužkového motoru je patrné, že na kroužky dosedají kartáče, které spojují rotorové vinutí s odporovým spouštěčem. Ten se skládá ze tří sériově spojených skupin rezistorů a přepínače, který postupně vyřazuje jednotlivé rezistory, až nakonec spojí vinutí do krátka.





Připojení rotorového spouštěče je nutné pro omezení záběrného proudu (asi na ½) a zároveň se zvětšuje záběrný moment motoru, protože připojením rezistoru do

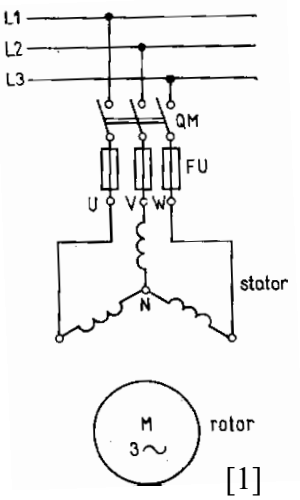
série s vinutím rotoru dochází ke zvětšení sklonu přímkové části momentové charakteristiky a tím i posunu skluzu zvratu blíž k ose momentu tedy ke skluzu s = 1 (hodnota maximálního momentu se nemění). Při zapnutí motoru jsou nejdříve zapojeny do série s rotorovým vinutím všechny rezistory, po rozběhu stroje a tedy po poklesu záběrného proudu rotorový spouštěč odpojí jednu řadu rezistorů a motor přejde na charakteristiky odpovídající tomuto odporu vinutí. Po dalším poklesu proudu (na stejnou hodnotu jako v prvním případě) dojde k vyřazení další řady rezistorů. Nakonec se vyřadí všechny rezistorové stupně, zkratovač spojí kroužky dokrátka a odklápěč odklopí kartáče. Motor teď pracuje jako motor nakrátko.

Nevýhodou je samozřejmě vznik proudových rázů, které způsobují indukci nežádoucího napětí a také mechanických vibrací způsobených přechody na jiné momentové charakteristiky. Další nevýhodou oproti strojům nakrátko jsou také výrazně větší výrobní a provozní náklady.

Tyto motory se proto používají tam, kde je potřeba hodně velkých záběrných momentů a zároveň nejsou na obtíž velké provozní náklady.

Asynchronní motory s kotvou kroužkovou se spouštějí rotorovým spouštěčem, který výrazně snižuje záběrný proud (asi na ½) a zároveň zvyšuje záběrný moment.

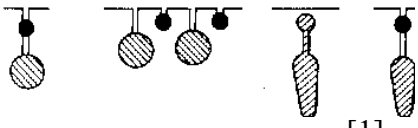
2.7. Asynchronní motory s kotvou nakrátko



[1]

Motory s kotvou nakrátko jsou nejpoužívanější motory menších výkonů i přes nevýhodu malého záběrného momentu a velkého záběrného proudu neboť jsou levné, provozně spolehlivé, bezpečné, mají velkou přetížitelnost a se změnou zatížení se jejich otáčky téměř nemění. Nevýhoda malého záběrného momentu a velkého záběrného proudu se dá odstranit speciálními konstrukcemi rotorového vinutí nakrátko a to tzv. dvojitou klecí nebo klecí vírovou.

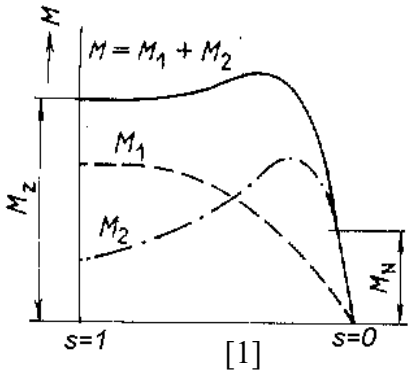
Motor nakrátko s dvojitou klecí


[1]

Má na rotoru dvě samostatné klece. Vnější klec bývá z mosazi nebo bronzu, takže má velký činný odpor a i při rozběhu má malou induktivní reaktanci, neboť je blízko povrchu a uzavírá se kolem ní malý počet magnetických indukčních čar (nazýváme ji klec rozběhová). Vnitřní klec tzv. pracovní, je zhotovena z mědi nebo hliníku, má velký průřez a má tedy činný odpor malý. Její induktivní reaktance je však při rozběhu velká, neboť je uložena hluboko v aktivním železe a uzavírá se kolem ní velké množství magnetických indukčních čar.

Po připojení motoru na síť se v obou klecích indukuje napětí a začne jimi procházet proud

s frekvencí proudu statorového. Výsledná impedance vnitřní klece je při rozběhu motoru vlivem velké induktivní reaktance výrazně větší než impedance klece vnější. Proto při rozběhu téměř celý proud prochází klecí vnější, a jelikož ta má velký činný odpor je i záběrný moment motoru velký. Během rozběhu se otáčky rotoru zvětšují (klesá skluz), tím se kmitočet rotorového proudu snižuje (procentuálně odpovídá procentu skluzu) až na jmenovitý kmitočet ($f_2 = 2$ až 3 Hz). Reaktance a tedy i impedance vnitřní klece je po skončení rozběhu malá. Rotorový proud se rozdělí na obě klece v obráceném poměru jejich impedancí, vnější klecí prochází proud malý, klecí vnitřní proud velký.

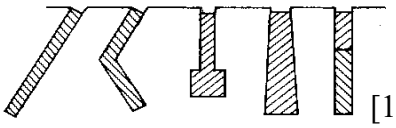


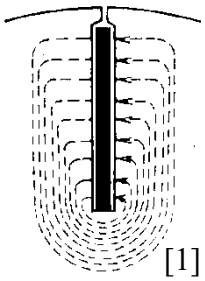
[1]

Výhodou motorů s dvojitou klecí je v porovnání s motory s klecí jednoduchou výrazně větší záběrný moment (při zhruba stejném záběrném proudu), ale výroba rotoru je náročnější a tedy i nákladnější. Motor s dvojitou klecí se používá u pohonů vyžadujících velký záběrný moment a častá spouštění.

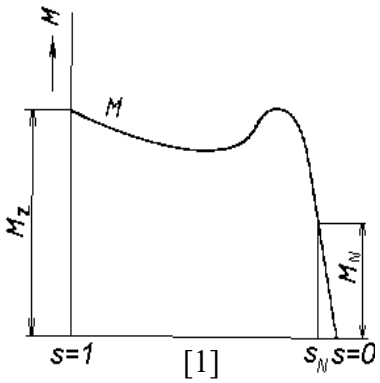
Motor nakrátko s vírovou klecí

Má na rotoru klec z úzkých hlubokých tyčí. Představme si tuto hlubokou tyč jako větší počet vodičů čtvercového průřezu uložených nad sebou, které jsou vůči sobě spojeny paralelně pomocí čelních kruhů. Činný odpor každého čtvercového vodiče je stejný, ale jejich induktivní reaktance je vlivem většího počtu magnetických indukčních čar tím větší, čím hlouběji je konkrétní vodič v drážce.


[1]


[1]

Jelikož při rozběhu je frekvence proudu vysoká (stejná jako frekvence statorového proudu) je velká i induktivní reaktance a tedy čím je vodič hlouběji, tím menší proud jím při rozběhu teče. Při rozběhu tedy prochází největší proud horní částí tyče. Se vzrůstajícími otáčkami se snižuje i frekvence proudu a tím i induktivní reaktance. Při plném běhu (jmenovitý skluz okolo 4%, proto i frekvence rotorového proudu je okolo 4% proudu statorového a induktivní reaktance je malá) je proud rozdělen téměř rovnoměrně po celém průřezu tyče.



[1]

Příliš hluboké drážky by však mohly zeslabit svazek plechů kolem hřídele, a proto mívají tyče různý průřez, popřípadě se můžou i kombinovat dva materiály s různou rezistivitou (jako dvojitá klec), ale vždy se jedná o stroje velkého průměru, tedy o stroje s výkony od 30 do 250 kW.

Opět výhodou motorů s vírovou klecí je v porovnání s motory s klecí jednoduchou výrazně větší záběrný moment (při zhruba stejném záběrném proudu).

2.8. Spouštění asynchronních motorů

Při spouštění asynchronních motorů vznikne v okamžiku připojení motoru proudový náraz v rozvodné síti a tím způsobí pokles napětí. Tato změna navíc způsobí elektromagnetickou indukci a po vedení se bude šířit tzv. spínací přepětí. Při spouštění motorů s kotvou nakrátko se v okamžiku zapnutí motor jeví jako transformátor s výstupním vinutím nakrátko (u motorů kroužkových je proud omezen rezistorovým spouštěčem) a proud odebíraný v prvním okamžiku ze sítě je až 7x větší než proud jmenovitý. Tento proud je proto nutné zmenšit tak, aby v síti nezpůsobil žádné problémy.

Spouštění asynchronních motorů nakrátko přímým připojením k síti

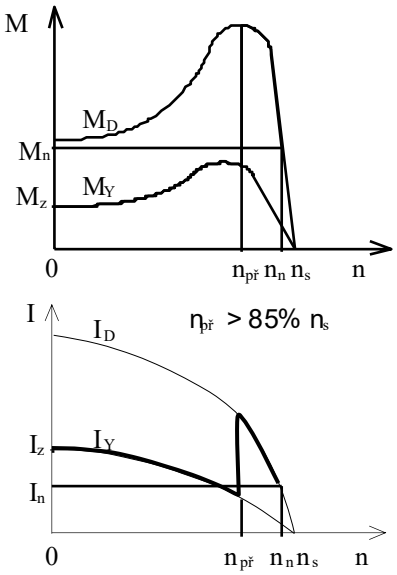
Je to nejjednodušší způsob, neboť motor se spustí jen zapnutím spínače. Podle normy lze spouštět přímo motory s výkonem do 3 kW. Přímo můžeme spouštět i větší motory, ale musíme si sjednat podmínky a čas zapnutí s dodavatelem elektrické energie.

Spouštění asynchronních motorů nakrátko přepínačem ⅄ -△

K tomuto spouštění je zapotřebí přepínače, který trojfázové vinutí statoru spojí nejdříve do hvězdy a po rozběhu se přepojí do trojúhelníku. Proudový náraz při spouštění, ale bohužel i záběrný moment se tím sníží na 1/3, což si můžeme dokázat odvozením poměru obou proudů:

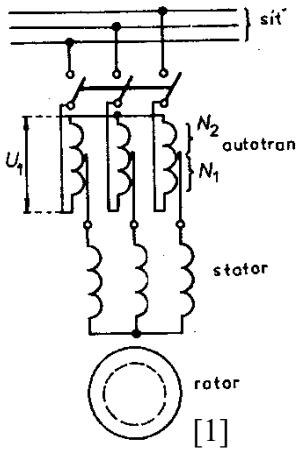
$$I_Y = \frac{U_f}{Z} = \frac{U_s}{\sqrt{3}.Z}, \quad I_D = \sqrt{3}.I_f = \frac{\sqrt{3}.U_s}{Z} \quad \Rightarrow \quad \frac{I_Y}{I_D} = \frac{\frac{U_s}{\sqrt{3}.Z}}{\frac{\sqrt{3}.U_s}{Z}} = \frac{1}{3},$$

kde U_f je fázové napětí, U_s je napětí sdružené a Z je impedance vinutí jedné fáze statoru. Při tomto spouštění však v síti vznikají dva proudové rázy (a v motoru dva rázy mechanické) - první při připojení motoru k síti a druhý při přepnutí z hvězdy do trojúhelníku. Pro snížení druhého proudového rázu přepínáme do trojúhelníku nejdříve až po dosažení 85 % n_s. Aby se při přepínání nezmenšila rychlost motoru, musí být přepínání co nejrychlejší.



Spouštění asynchronních motorů nakrátko autotransformátorem

Před spouštěním motoru nastavíme autotransformátor (nebo jiný regulovatelný zdroj napětí) na nejnižší hodnotu napětí, spustíme motor a po jeho rozběhnutí napětí autotransformátoru



[1]

zvyšujeme. Po dosažení jmenovitých otáček autotransformátor vyřadíme (jednak aby nevznikaly další ztráty, jednak bývá autotransformátor dimenzován jen na krátkodobý chod) a motor napájíme přímo ze sítě. Záběrný proud odebíraný ze sítě se sníží v poměru počtu výstupních závitů ke všem závitům autotransformátoru $U_2 = U_1 \frac{N_2}{N_1 + N_2}$, $U_1 I_1 = U_2 I_{sp} \Rightarrow$

$I_1 = I_{sp} \frac{N_2}{N_1 + N_2}$, kde I_{sp} je proud procházející motorem při spouštění.

Samozřejmě, že se stejně sníží také záběrný moment.

Spouštění asynchronních motorů nakrátko s dvojitou klecí

Tyto motory spouštíme stejnými způsoby jako běžné motory nakrátko.

Spouštění asynchronních motorů nakrátko s vírovou klecí

Tyto motory jsou nejčastěji konstruovány na velké výkony, a proto je spouštíme nejčastěji autotransformátorem.

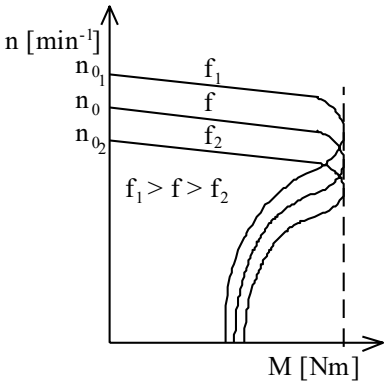
Spouštění asynchronních motorů kroužkových

Asynchronní motory s kotvou kroužkovou se spouštějí rotorovým spouštěčem, který výrazně snižuje záběrný proud (asi na ½) a zároveň zvyšuje záběrný moment (viz kapitola motor s kotvou kroužkovou), motor po rozběhu pracuje jako motor nakrátko.

2.9. Regulace otáček asynchronních motorů

Ze vztahu pro otáčky asynchronního motoru $n = \frac{60 \cdot f}{p} \cdot (1 - s)$ je patrné, že otáčky můžeme regulovat frekvencí, počtem pólových dvojic nebo skluzem (jen u kroužkových motorů).

Regulace otáček změnou frekvence

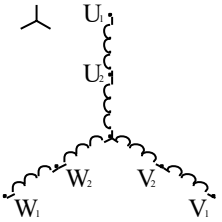


V dnešní době nejpoužívanější regulace, neboť s rozvojem elektronických měničů jsme schopni měnit frekvenci plynule od jednotek Hz až do několika set Hz. Zvýší-li se frekvence zdroje, zvýší se otáčky magnetického pole statoru a tedy i otáčky rotoru naprázdno. Při snížení frekvence je tomu naopak.

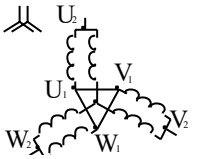
Ze vztahu pro indukované napětí $U_i = 4{,}44 \cdot \Phi_{MAX} \cdot f \cdot N \cdot k_v$ vyplývá, že magnetický tok Φ je přímo úměrný napětí a nepřímo úměrný frekvenci. Proto při regulaci otáček frekvencí musíme regulovat i napětí (při zvyšování frekvence musíme zvyšovat i napětí

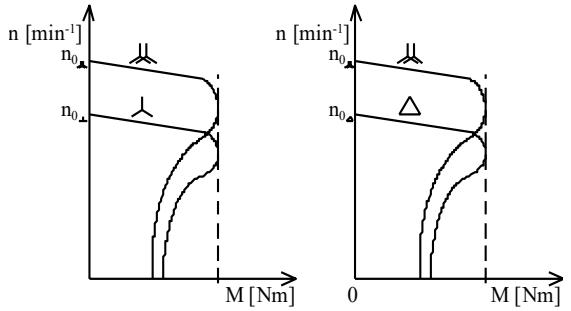
a naopak), aby magnetický tok zůstával stejný, a tím zůstane zachován i stejný maximální moment motoru. Ke změně frekvence se nejčastěji používají frekvenční měniče s tyristory nebo s IGBT tranzistory.

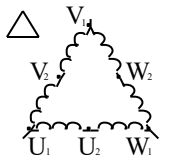
Regulace otáček změnou počtu pólpárů

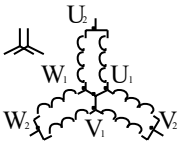


Změna počtu pólpárů se provádí jen u motorů s kotvou nakrátko, jejichž statory mají vinutí každé fáze složené ze dvou částí (v polovině vinutí je odbočka). Vinutí statoru pak můžeme zapojovat do série nebo paralelně a otáčky naprázdno se mění skokově mezi dvěmi hodnotami (např. n_s = 750 - 1500 pro vinutí s přepínáním 8 - 4 póly). Nejčastěji se používá přepínání





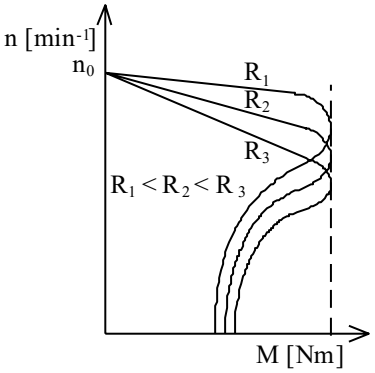




hvězda - dvojitá hvězda nebo trojúhelník - dvojitá hvězda. Některé motory mají dvě samostatná vinutí, jedno s odbočkou a druhé bez odbočky. Potom lze regulovat otáčky ve třech stupních
(3000 - 1500 - 750).

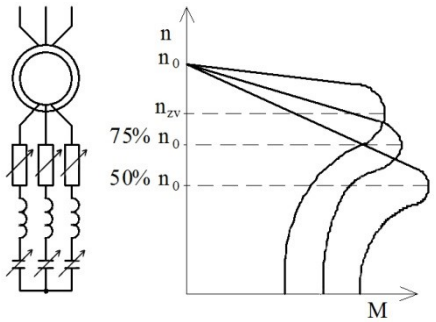
Regulace otáček změnou skluzu

Otáčky pomocí skluzu můžeme regulovat pouze u kroužkových motorů zapojením odporu nebo RLC obvodu do série s kotvou.



Regulace otáček sériově ke kotvě připojeným rezistorem.
Lze použít jen u motorů kroužkových. Se vzrůstajícím odporem zapojeným do série s rotorovým vinutím, klesá sklon přímkové části momentové charakteristiky, přičemž otáčky naprázdno i maximální moment zůstávají stejné. Zapojení odporového regulátoru je stejné jako zapojení rotorového spouštěče, ale tento spouštěč musí být dimenzován na trvalý chod motoru.

Regulace otáček sériově ke kotvě připojeným RLC obvodem



Do každé fáze kroužkového rotoru se do série zapojí proměnný sériový RLC obvod. Se změnou hodnot RLC se bude měnit rezonanční kmitočet a tedy kmitočet rotorového proudu. Se zvyšující se frekvenci rotorového proudu se zvětšuje i skluz (procentuální hodnota proudu vůči proudu statoru i procentuální hodnota skluzu jsou shodné) a tím

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

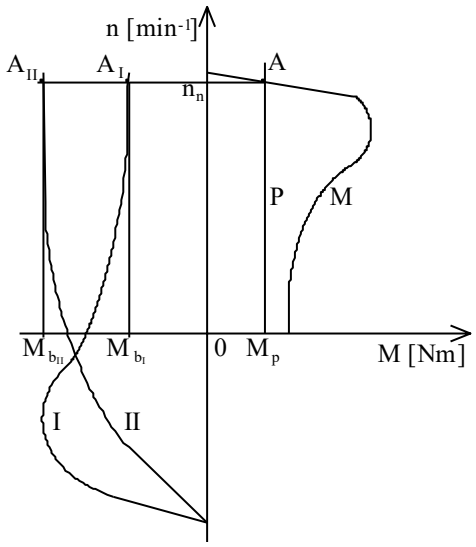
otáčky klesají. Zároveň se bude měnit sklon charakteristiky i maximální moment (otáčky naprázdno zůstanou stejné).

2.10. Brzdění asynchronních motorů

Brzdění reverzací (protiproudem)

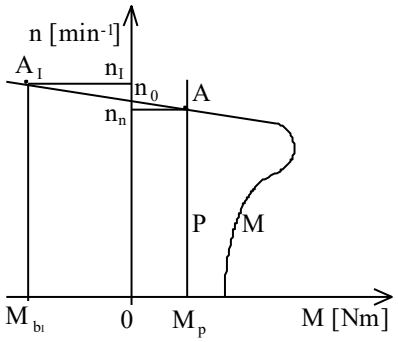
Brzdícího účinku se dosáhne tak, že se ve statoru vymění se dvě fáze mezi sebou a tím se vytvoří točivé magnetické pole, které se otáčí opačným směrem než rotor. Do rotoru se začne indukovat napětí vytvářející proud. Ten vytváří točivý moment, který chce roztočit rotor stejným směrem jakým se točí magnetické pole statoru a tím rotor brzdí. K rotorovému vinutí (lze provést jen u motorů kroužkových) je vhodné zapojit do série rezistor, aby se zmenšil proudový náraz v okamžiku přepnutí a zvětšila se činná složka brzdného proudu a tím i brzdný moment. Motor musíme samozřejmě včas odpojit, aby se nám neroztočil opačnými otáčkami - to bývá realizováno buď časovým spínačem, který je nastaven na dobu poklesu otáček na minimum nebo častěji snímačem otáček, který motor odpojí při poklesu otáček pod nastavenou minimální hodnotu a motor se v obou případech nechá samovolně doběhnout.

Z momentové charakteristiky je patrné, že při brzdění motorů s kotvou nakrátko (bez sériově k rotoru zapojeného rezistoru) by pracovní bod ***A*** (průsečík momentové charakteristiky motoru ***M*** a momentové charakteristiky pracovního stroje ***P***) přešel na charakteristiku ***I*** do bodu A_I a byl by brzděn brzdným momentem M_{bI}. U motorů kroužkových, kde lze zapojit rezistor do série s rotorovým vinutím se zvyšuje sklon přímkové části charakteristiky a tím i brzdný moment M_{bII} a pracovní bod přechází na charakteristiku ***II*** do bodu A_{II}.



Brzdění rekuperací

Rekuperací brzdíme, jestliže se asynchronní motor roztočí nad synchronní otáčky (např. při spouštění břemene jeřábem nebo při jízdě trakčního vozidla s kopce), změní se tím smysl proudu, motor pracuje v generátorickém chodu a je brzděn zpět na jmenovité otáčky. Pracovní bod ***A*** se tedy přesune po momentové charakteristice do bodu A_I a je zpomalován momentem M_{bI} zpět na jmenovité otáčky (do pracovního bodu ***A***).



Brzdění stejnosměrným proudem

Asynchronní motor se odpojí od střídavé sítě a jedna nebo dvě fáze se připojí ke zdroji

stejnosměrného napětí. Ve statoru se vytvoří statické magnetické pole a do rotorového vinutí se indukuje napětí vyvolávající průchod proudu. Ten dle Lenzova zákona působí proti změně, která jej vyvolala a vytváří tedy brzdný moment.

2.11. Jednofázové asynchronní motory

Jednofázový motor bez pomocné fáze

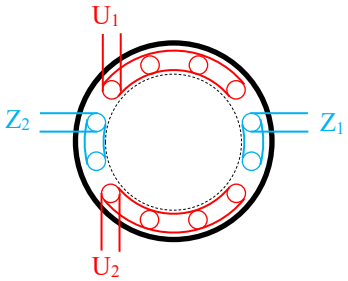
Ve statoru je navinuto vinutí, které je uloženo jen ve 2/3 drážek, rotor má vinutí nakrátko.

Připojíme-li tento motor na zdroj střídavého napětí, začne bručet, ale neroztáčí se. Proud procházející statorovým vinutím vytvoří jen střídavé magnetické pole (ne točivé), které indukuje napětí do vinutí rotoru. Rotorovým vinutím začne procházet proud, který vytvoří také magnetické pole.

Pro vysvětlení principu činnosti tohoto motorku si můžeme magnetické pole statoru pomyslně rozložit na dvě stejně silná točivá pole, která mají opačné směry a tím se ruší. Pootočíme-li poté rotorem, způsobíme zesílení točivého pole působícího ve směru pootočení (přičte se k němu pole rotoru) a motor se začne v tomto směru roztáčet a vliv opačného točivého pole bude s rostoucími otáčkami dále slábnout.

Roztáčecí motory se používají např. u malých míchaček betonu, u uměleckých brusek či hrnčířských kruhů.

Jednofázový motor s pomocnou fází



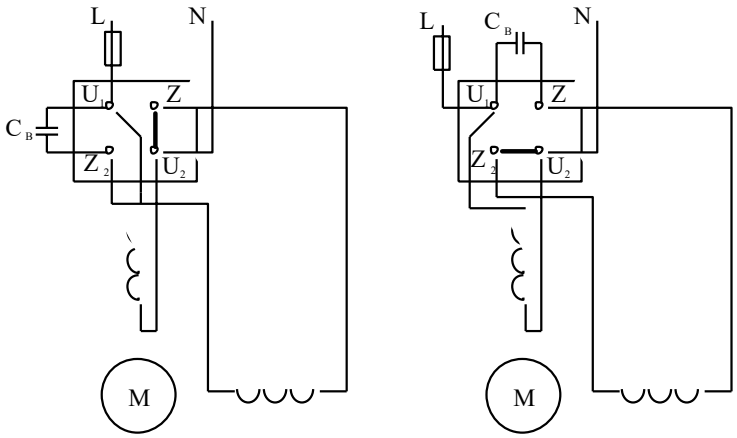
Jednofázový asynchronní motor má ve statoru, složeném ze statorových plechů, dvojí vinutí. Hlavní vinutí vyplňuje 2/3 drážek (U_1-U_2), pomocné vinutí (pomocná fáze) je ve zbývající třetině drážek a je o 90° pootočeno oproti vinutí hlavnímu (Z_1-Z_2). Rotor je v provedení nakrátko.

Předpokladem pro vznik točivého magnetického pole statoru je časové posunutí průběhu střídavého proudu v pomocném vinutí oproti průběhu proudu v hlavním vinutí. Střídavá magnetická pole hlavního a pomocného vinutí jsou pak vzájemně časově a prostorově posunuta (pootočena) a společně vytvářejí točivé magnetické pole. Toto točivé pole pak indukuje napětí do vodičů rotoru, kterými začne procházet proud a síla působící na rotorový vodič s proudem v magnetickém poli statoru tento rotor roztočí (stejným směrem jakým se otáčí magnetické pole statoru).

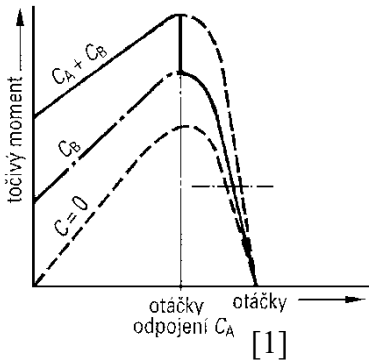
Fázového posunutí mezi proudy v hlavním a pomocném vinutí a tím k vytvoření točivého magnetického pole je dosaženo nejčastěji připojením kondenzátoru k pomocnému vinutí, případně odporovým bifilárním pomocným vinutím nebo velmi zřídka zvýšenou indukčností pomocného vinutí (malý záběrný moment).

Kondenzátorový motor

Kondenzátorový motor je jednofázový asynchronní motor s kondenzátorem zapojeným k pomocné fázi. Potřebné fázové posunutí mezi pomocnou a hlavní fází zde tedy vytváří kondenzátor. Kondenzátor je většinou připevněn na krytu motoru a je zapojen mezi fázi a začátek nebo konec (podle směru otáčení) pomocného vinutí. Je-li vinutí rozděleno na dvě části (čtyřpólový motor) je kondenzátor sériově zapojen mezi tyto části. Má-li se motor používat pro otáčení oběma směry nebo pro brždění reverzací je nutné mít možnost přepojení kondenzátoru na svorkovnici (stykačovým zapojením). Po připojení ke zdroji střídavého napětí začne hlavním vinutím procházet proud a vinutím pomocným proud elektricky posunutý o téměř 90° vytvoří se točivé magnetické pole, které jak již bylo řečeno, indukuje napětí do vodičů rotoru, těmi začne procházet proud a síla působící na rotorový vodič s proudem v magnetickém poli statoru rotor roztočí.



Pro zvýšení záběrného momentu můžeme použít rozběhový kondenzátor C_A zapojený paralelně k provoznímu kondenzátoru C_B (do série s C_A je navíc zapojen rozpínací kontakt snímače otáček, který jej po rozběhu odpojí). Záběrný moment lze díky kapacitě obou kondenzátorů zvýšit až na trojnásobek momentu jmenovitého a motor můžeme spouštět i s na hřídel připojenou zátěží. Po rozběhu se rozběhový kondenzátor C_A odpojuje a v činnosti zůstává jen provozní kondenzátor C_B. Odpojení je nutné, neboť by pomocným vinutím protékal příliš velký proud a přehříval jej. Odpojení se uskutečňuje tepelným nebo nadproudovým relé, nebo kontaktem snímače otáček. Při odpojení obou kondenzátorů by motor pracoval jako jednofázový asynchronní motor bez pomocné fáze.



[1]

Pro správnou činnost kondenzátorového motoru by měl mít provozní kondenzátor přibližně 1,3 krát větší jalový výkon než je činný výkonu motoru a rozběhový kondenzátor by měl mít kapacitu asi třikrát větší než kondenzátor provozní. Jelikož kondenzátor tvoří s indukčností pomocného vinutí sériový kmitavý obvod, může být na kondenzátoru (i na pomocném vinutí) napětí výrazně vyšší než napětí síťové a na toto napětí je musíme kondenzátor (i izolaci pomocného vinutí) dimenzovat.

Nevýhodou těchto motorů je nutnost kontroly kondenzátorů. Kondenzátorové motory s výkonem do 2 kW se používají v domácích spotřebičích (např. v ledničkách a pračkách).

Jednofázový motor s pomocnou odporovou fází

Pomocné vinutí je navinuto z odporového drátu. Většinou je toto vinutí provedeno jako bifilární vinutí (polovina závitů je zde navinuta jedním směrem a polovina druhým směrem, proto její celková indukčnost je téměř rovna nule). Pomocné vinutí bez indukčnosti a hlavní vinutí s indukčností vytvářejí fázový posun a dojde tedy ke vzniku točivého magnetického pole, které indukuje napětí do rotoru nakrátko, tím začne procházet proud a vytvoří se síla, která rotor roztočí.

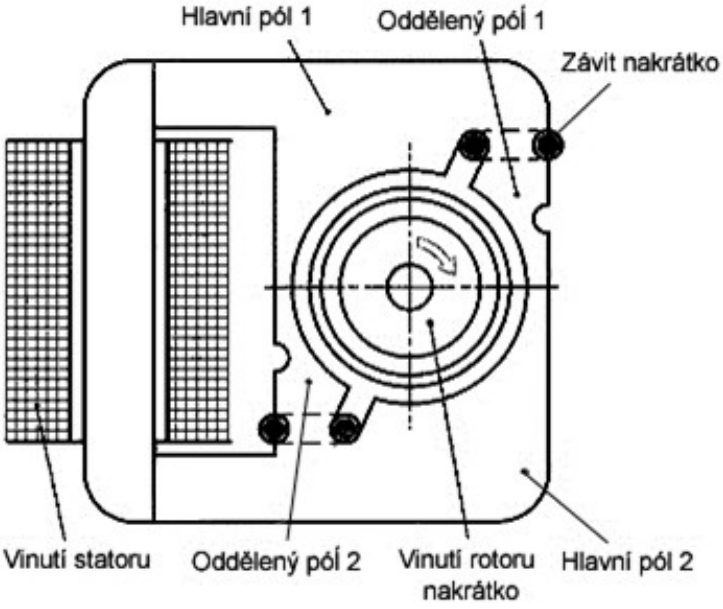
Pomocné vinutí má velký činný odpor, což snižuje záběrný proud, ale po rozběhu musí být odpojena (např. kontaktem snímače otáček), aby nedocházelo k přehřívání motoru. Po rozběhu motor pracuje jako jednofázový motor bez pomocné fáze.

Jednofázové motory s pomocnou odporovou fází se vyrábějí do výkonů asi 300 W, jejich rozběhový moment odpovídá přibližně momentu jmenovitému. Tyto motory se používají v aplikacích s malou frekvencí rozpínání, např. jako pohony kompresorů v chladničkách nebo pohony čerpadel pro olejové hořáky.

Motor se stíněnými póly

Stator motoru se stíněnými póly má dva hlavní póly a od nich je drážkou oddělena menší část magnetického obvodu, čímž jsou vytvořeny dva oddělené (odstíněné) póly. Kolem oddělených pólů je uloženo vinutí nakrátko. Cívka hlavního vinutí je navinuta na izolační kostřičce a pak je nasunuta na magnetický obvod. Rotor je tvořený hřídelí a na ní nalisovaného svazku rotorových plechů s vinutím v provedení nakrátko

Po připojení ke zdroji napětí, začne hlavní cívkou procházet proud, který vybudí střídavý magnetický tok, jehož část prochází i závity nakrátko. Do závitů nakrátko se indukuje napětí fázově posunuté téměř o 90° proti napětí na statorovém vinutí. Mezi proudem ve statorovém vinutí a proudem tekoucím vinutím nakrátko je proto fázový posun a tyto fázově posunuté proudy vytvářejí točivé magnetické pole. Magnetické póly točivého pole se postupně posunují od jednoho statorového pólu k dalšímu v pořadí: hlavní pól 1, oddělený pól 1, hlavní pól 2, odstíněný pól 2. Toto točivé pole indukuje napětí do vinutí rotoru, kterým začne procházet proud a na vodič s proudem v magnetickém poli působí síla, která vytváří točivý moment a rotor se začne otáčet stejným



směrem, jakým se točí magnetické pole statoru.
Směr otáčení je podmíněn uspořádáním pólů a nemůže být elektricky změněn.
Motory se stíněnými póly jsou docela robustní a levné, ale jejich nevýhodou je malá účinnost (kolem 30%). Používají se do větráků topení, nebo mikrovlnných trub nebo do malých kalových čerpadel (pračky) při výkonech okolo 300 W.

3. SYNCHRONNÍ STROJE

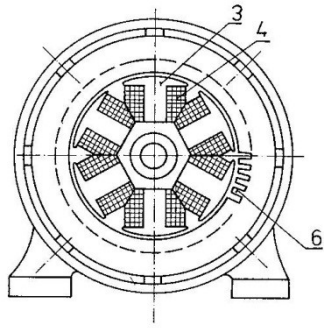
Synchronní stroj je střídavý elektrický točivý stroj, jehož frekvence svorkového napětí je úměrná otáčkám rotoru ($f = \frac{n_s . p}{60}$). Synchronní stroje jsou nejčastěji využívány pro výrobu střídavé elektrické energie, jedná se tedy o synchronní generátory neboli ***alternátory***. Synchronní stroje mohou dále pracovat jako ***motory*** pro pohony s potřebou konstantních otáček nebo jako synchronní ***kompenzátory*** pro kompenzaci účiníku.

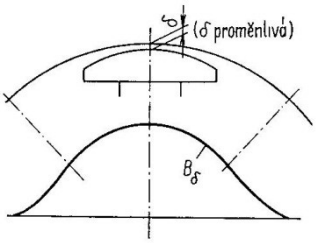
3.1. Konstrukční uspořádání synchronních strojů

Synchronní stroje se skládají ze statoru, rotoru a budiče.

Stator se skládá (podobně jako stator asynchronního motoru) ze svařované nebo odlité kostry, ve které je vložen svazek statorových plechů. Plechy jsou buď vcelku, nebo u velkých strojů poskládány ze segmentů. Na vnitřním průměru těchto plechů jsou drážky, v nichž je uloženo třífázové vinutí. Začátky a konce vinutí jsou vyvedeny na svorkovnici.

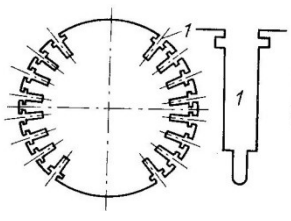
Konstrukční uspořádání ***rotoru*** rozděluje synchronní stroje do dvou skupin, buď se jedná o stroje s vyniklými (vyjádřenými) póly nebo o stroje s hladkým rotorem. Stroje s vyniklými póly mají rotor tvořen hřídelí na níž je magnetové kolo s příslušným počtem pólů (4 - 36).

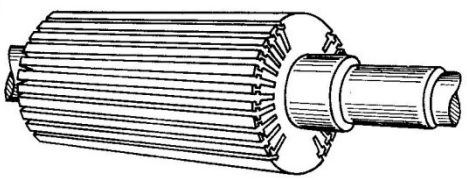


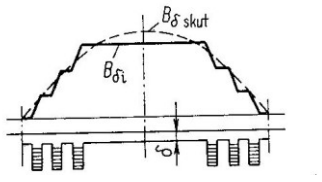


Rotor bývá nejčastěji poskládán z plechů, aby se zamezilo ztrátám vzniklým pulsací budícího proudu (u velkých strojů se opět skládá ze segmentů), stroje s velkou vzduchovou mezerou mají rotor vyroben z jednoho kusu železa. Poloměr zaoblení pólových nástavců je menší než poloměr vnitřní strany statoru a to zajišťuje téměř sinusový tvar magnetické indukce B_δ ve vzduchové mezeře. Na pólech je navinuto budící vinutí, zapojené sériově tak, aby vznikl vždy střídavě severní a jižní pól.

Stroje s hladkým rotorem mají rotor tvořený plným hladkým válcem vykovaným z jednoho kusu legované oceli (chromniklová ocel s příměsí molybdenu). Na asi dvou třetinách obvodu







tohoto válce jsou podélně vyfrézovány drážky, ve kterých je uloženo dvoupólové budící vinutí. Vinutí je uzavřeno v drážkách bronzovými klíny (ty jsou často spojeny kruhy nakrátko a tvoří amortizér - viz

dále) a čela vinutí jsou zajištěna bandážovacími kruhy z nemagnetické oceli (jedná se totiž o rychloběžné stroje = 3000 ot.min^{-1}). Magnetická indukce má přibližně tvar lichoběžníku avšak vzhledem k časovému posunu jednotlivých napětí, magnetické setrvačnosti a vzhledem k velkému počtu drážek na pól a fázi (3 až 4) má výsledné indukované napětí téměř přesně sinusový průběh.

Budič slouží k napájení budícího vinutí rotoru a tím k vytvoření potřebného magnetického pole. Podle uložení budícího systému se synchronní stroje dělí na:

a) Synchronní stroje s budícím vinutím ve statoru - asi do výkonu 10 kVA.
b) Budící proud se přivádí do rotoru přes kartáče dosedající na kroužky
c) Synchronní stroje s budícím vinutím v rotoru - častější (dnes i pro stroje do 10 kVA), neboť odpadá nutnost kontaktního styku a navíc zůstává ve statoru více místa na aktivní vinutí.

Je-li tedy budící proud vyroben přímo v synchronním stroji, mluvíme o *vlastním buzení*. Je- li buzen dynamem (nejčastěji), motorgenerátorem, akumulátorovou baterií či přímo ze sítě přes usměrňovač hovoříme o stroji s *cizím buzením*.

Malé synchronní stroje bývají někdy bez buzení, budící systém pak nahrazuje rotor s permanentním magnetem.

3.2. Synchronní alternátor

Synchronní alternátor poháněný vodní turbínou nazýváme ***hydroalternátor*** což je pomaloběžný stroj s vyniklými póly. Často se jedná o stroje s malou hloubkou a velkým průměrem. K pohonu se používají nejčastěji Kaplanovy či Francisovy turbíny a většinou mají hřídel umístěnu svisle.

Turboalternátory jsou pak většinou dlouhé stroje s malým průměrem s hřídelí uloženou vodorovně. Jsou poháněny parními nebo spalinovými turbínami, jedná se o rychloběžné stroje s hladkým rotorem.

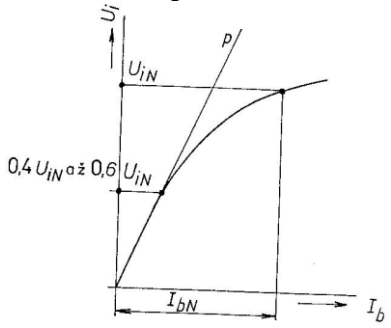
3.3. Princip synchronního alternátoru

Rotor je buzen stejnosměrným proudem, takže se vytvoří statické magnetické pole. Budu li tímto rotorem otáčet synchronními otáčkami ($n_s = 60.f/p$), vytvoří se ve vzduchové mezeře točivé magnetické pole. Indukce v každém bodě vzduchové mezery se bude měnit sinusově (viz obr). Bude se tedy do každé cívky statorového třífázového vinutí indukovat napětí $u_i = \Phi.\omega.\sin \omega t$, tedy maximální hodnota napětí pro N závitů bude $U_i = \Phi.\omega.\ N = 2.\pi.f.\Phi.N$. Toto napětí pak odebíráme ze svorek statoru. Velikost indukovaného napětí U_i je tedy funkcí magnetického toku Φ vybuzeného budícím proudem rotoru I_b.

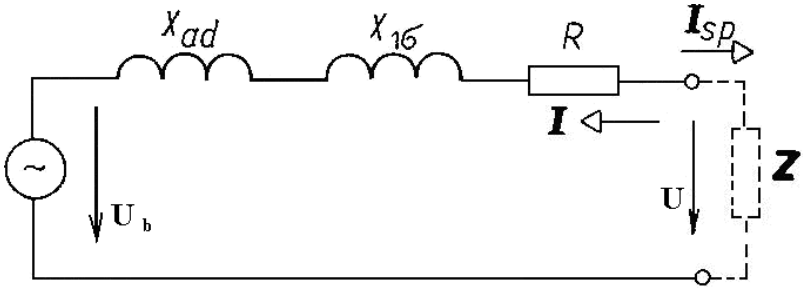
3.4. Charakteristika naprázdno a náhradní schéma synchronního alternátoru

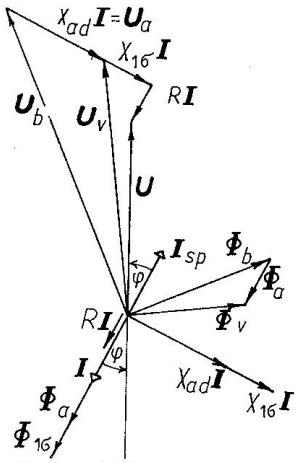
Závislost indukovaného napětí na budícím proudu nazýváme *charakteristika naprázdno*, kde I_{bN} je jmenovitý budící proud a U_{iN} jmenovité indukované napětí. Přímka p je pak charakteristika vzduchové mezery.

Připojíme- li k vinutí statoru (např. do hvězdy) zátěž s impedancí Z, začnou procházet uzavřeným souměrným obvodem proudy I_U, I_V, I_W, fázově posunuté o úhel φ proti napětí. Tyto proudy vytvoří nové točivé magnetické pole, které nazýváme *pole reakce kotvy*. Magnetickému toku tohoto pole odpovídá tzv. *reaktance reakce kotvy* X_{ad}. Kolem vinutí statoru se však vytváří navíc tzv. *rozptylový tok* $\Phi_{1\sigma}$ a jemu pak odpovídá *rozptylová reaktance* $X_{1\sigma}$.



Svorkové napětí synchronního stroje je potom oproti napětí indukovanému výsledným magnetickým tokem každé cívky zmenšeno o úbytek na reaktanci reakce kotvy, o úbytek na rozptylové reaktanci a o ztráty způsobené činným odporem R, lze tedy psát: $U = U_b + jX_{ad}I + jX_{1\sigma}I + RI$, kde U_b představuje zdroj ideálního napětí.

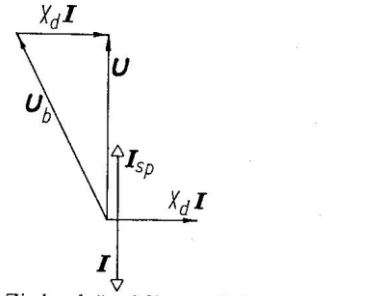




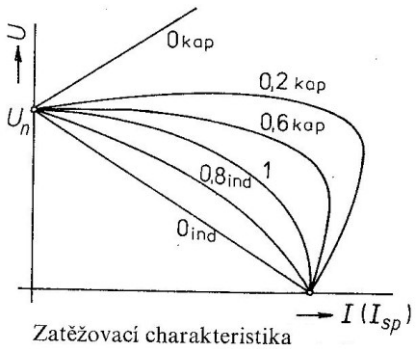
Sloučíme-li X_{ad} a $X_{1\sigma}$ v tzv. synchronní reaktanci X_d, tedy $X_{ad} + X_{1\sigma} = X_d$ a nepatrný úbytek RI zanedbáme, potom platí: $U = U_b + jX_dI$

3.5. Zatěžovací a budící charakteristika synchronního stroje

Zatěžovací charakteristika udává závislost svorkového napětí na proudu při konstantním buzení. Ta má pro různé druhy zatížení různý tvar. Pro čistě činnou zátěž (tedy pro cos φ = 1) vyplývá z fázorového diagramu $U^2 = U_b^2 - (X_dI)^2$, což je rovnice elipsy. Pro čistě induktivní zátěž (cos φ = 0) platí, že $U = U_b - X_dI$ a pro čistě kapacitní zátěž platí $U = U_b + X_dI$, což jsou



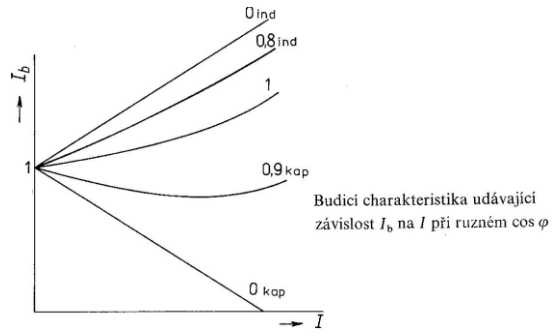
Zjednodušený fázorový diagram turboalternátoru při čistě činné zátěži s odporem R_{sp}



Zatěžovací charakteristika

rovnice přímek s opačnými směrnicemi. Mezi těmito přímkami pak leží charakteristiky pro jiné účiníky. A z nich vyplývá, že se synchronní stroj při induktivní zátěži odbuzuje a při kapacitní se přibuzuje.

Aby se tedy napětí na svorkách stroje při různém zatížení neměnilo, musíme měnit budící proud. Nabuzení stroje při stálém napětí pro různé cos φ udává tzv. budící charakteristika, což je závislost I_b na I při různém cos φ.



Budicí charakteristika udávající závislost I_b na I při různém cos φ

Kdybychom náhle odlehčili stroj, proud by poklesl na nulu a na svorkách by se objevilo zvýšené napětí U_{ZV}, potom poměr

$$\frac{U_{ZV} - U}{U}.100 = \varepsilon$$

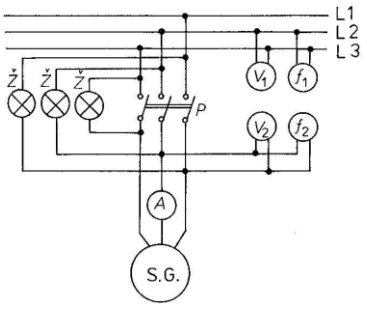
nazývaný poměrné zvýšení napětí udává tzv. tvrdost stroje. Je-li ε < 10% považujeme stroj za tvrdý, tedy jeho napětí se se zatížením mění jen málo (tvrdé stroje mají malou vzduchovou mezeru). Velmi měkké stroje (ε > 50%) potřebují pro udržení konstantního napětí samočinné regulátory. Velké stroje se však vyrábějí jako měkké, neboť mají malý zkratový proud.

3.6. Fázování a paralelní chod synchronních alternátorů

Když výkon jednoho alternátoru nestačí krýt spotřebu, pak připojujeme k jednomu alternátoru alternátor druhý, třetí atd. Systém takto paralelně pracujících alternátorů vytvoří tzv. tvrdou síť. U této sítě jsou napětí i frekvence stálé, teoreticky nezávislé na zatížení.

Chceme-li připojit synchronní stroj k tvrdé síti, a tím zvětšit její výkon, musíme splnit určité podmínky mezi sítí a alternátorem - mluvíme o tzv. o fázování synchronního stroje na síť. Při fázování synchronního stroje na síť nemá vzniknout v okamžiku připojení žádný proudový náraz v síti a vyrovnávací moment mezi sítí a strojem, z toho vyplývá, že napětí sítě U_1 se rovná napětí stroje U a jelikož $U_1 = U_{1max} \sin(\omega_1 t + \varphi_1)$ a $U = U_{max} \sin(\omega t + \varphi)$. Potom musí platit:

1.) $U_{1max} = U_{max}$
2.) $\omega_1 = \omega$
3.) $\varphi_1 = \varphi$
4.) stejný sled fází



Shodnost napětí se zjišťuje voltmetry V_1 a V_2, shodnost frekvence kmitoměry f_1 a f_2, sled fází a fázový posun napětí

fázovacími žárovkami Ž. Například při fázování na „tmu“ budou při roztáčení stroje a jeho nabuzování žárovky blikat. Blikají-li všechny žárovky současně, znamená to, že sled fází sítě i synchronního stroje je shodný (při nesouměrném blikání žárovek je třeba přehodit dvě libovolné fáze mezi sebou). Jsou-li frekvence (řídí se otáčkami poháněcího stroje) a napětí (mění se budícím proudem I_b) nabuzeného stroje stejné s frekvencí a napětím sítě, pak při zhasnutých žárovkách lze zapnutím vypínače P synchronní stroj připojit k síti. Při dobrém přifázování je proud mezi sítí a strojem nulový a ukazatel ampérmetru A se nevychýlí. Dnes se v elektrárnách pro fázování používají tzv. fázovací automaty, které v principu pracují stejně, jen nastavení napětí a frekvence stroje si řídí samy.

Připojený stroj nedává, ale ani neodebírá ze sítě žádný výkon (mechanické ztráty a ztráty v železe kryje poháněcí stroj). Napětí U_b a napětí U stroje jsou stejná vybuzená tokem.$\Phi_b = \Phi_v$ Zmenšíme-li budící proud I_b svorkové napětí U se nezmění, protože je drženo tvrdou sítí, Φ_v se také nezmění, změní se ovšem Φ_b. Začne tedy strojem procházet proud I, který vytvoří magnetický tok Φ_a pro který platí: $\Phi_v = \Phi_b + \Phi_a$

Proud $I = I_q$ je proudem jalovým (stroj pracuje jako ideální cívka).

Naopak zvětšíme-li budící proud I_b, zvětší se i magnetický tok Φ_b a aby výslední tok Φ_v zůstal konstantní, musí strojem procházet proud I a s ním ve fázi se vybudí magnetický tok Φ_a pro který opět platí: $\Phi_v = \Phi_b + \Phi_a$

Stroj dodává jalový proud $I = I_q$ (stroj pracuje jako ideální kondenzátor.)

V prvním případě mluvíme o podbuzeném a ve druhém o přebuzeném synchronním stroji.

Vraťme se na začátek, kdy buzení synchronního stroje odpovídá chodu stroje při nafázování. Představme si, že poháněcí stroj se snaží synchronní stroj zrychlovat, ale jelikož jsou otáčky synchronního stroje drženy tvrdou sítí a nemohou se měnit, přemění se mechanický příkon poháněcího stroje v synchronním stroji na elektrický výkon. Synchronní stroj začne dodávat do sítě činný proud $I = I_p$.

Bude-li naopak poháněcí stroj synchronní stroj brzdit (otáčky se opět nemohou změnit), synchronní stroj bude ze sítě odebírat činný proud $I = I_p$.

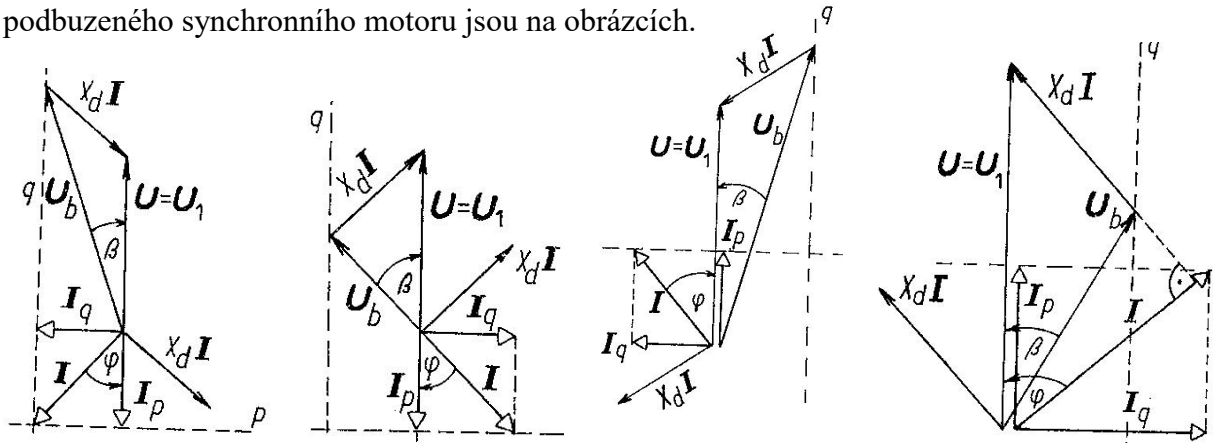
V prvním případě stroj pracuje v generátorickém chodu ve druhém pak v motorickém chodu.

Budeme-li tedy měnit budící proud I_b a zároveň regulovat otáčky poháněcího stroje, bude mít výsledný proud I složku jalovou I_q i činnou I_p (velikost I_q bude závislá na proudu I_b, velikost I_p bude závislá na regulátoru otáček poháněcího stroje).

Jestliže nakreslíme fázor napětí směrem vzhůru pak bude-li proud směřovat do dolní poloroviny bude stroj pracovat jako generátor, bude-li směřovat do poloroviny horní bude pracovat jako motor. Bude-li směřovat do pravé poloroviny, bude stroj tzv. přebuzen (budící

proud do rotoru bude větší, než byl v okamžiku nafázování), bude-li směřovat do poloroviny levé bude tzv. podbuzen.

Fázorové diagramy přebuzeného a podbuzeného synchronního alternátoru a přebuzeného a podbuzeného synchronního motoru jsou na obrázcích.



Úhel mezi fázorem napětí U_b a fázorem napětí $U = U_1$ se nazývá zátěžný úhel β. Při chodu naprázdno je úhel beta blízký nule, v zatíženém stavu je u alternátoru $\beta < 0$ a u motoru $\beta > 0$ (viz fázorové diagramy). U alternátoru je β úhel, o který předbíhá magnetové kolo polohu, která přísluší chodu na prázdno, u motoru je β úhel, o který se magnetové kolo zpožďuje za polohou příslušející chodu na prázdno.

Velikost zátěžného úhlu závisí na buzení a zatížení stroje. Při změně zatížení se změní zátěžný úhel. Změníme-li však zatížení náhle, neustálí se magnetové kolo v nové poloze okamžitě, ale vlivem setrvačnosti rotoru přechází tento do nové rovnovážné polohy pomalu a to tak, že tuto polohu přejde a vrací se zpět, tedy kývá kolem nové rovnovážné polohy. Kývání se omezuje pomocí tlumiče, neboli amortizéru. U hladkého rotoru je tlumič sestrojen z měděných pásků uložených pod klíny a spojených na čelech měděnými kruhy. U strojů s vyniklými póly je tlumič vytvořen měděnými tyčemi umístěnými v pólových nástavcích, opět je na čelech spojen nakrátko. Otáčí-li se rotor stejnou rychlostí jako magnetické pole statoru, neindukuje se v tlumiči žádné napětí a neprochází jím žádný proud, teprve při kývání vzniká asynchronní moment, který zvětšuje stabilitu stroje. Stabilní chod je tedy možný jen pro $0 < |\beta| < \pi/2$ (u dvoupólového stroje – čím víc pólů tím menší je maximální úhel β).

3.7. Synchronní motor

Synchronní motor se vyznačuje tím, že se jeho otáčky nemění se zatížením, nemění-li se frekvence přiváděného napětí, moment zátěže však musí být menší než tzv. moment zvratu, při kterém by motor vypadl ze synchronního chodu. Synchronní motory se dlouho nemohly uplatnit a to pro potíže při jejich rozběhu, musely být totiž nejdříve roztočeny na synchronní otáčky a teprve poté připojeny na síť. Dnes se však synchronní motory staví jako autosynchronní, tj. s vlastním asynchronním rozběhem (do 15 MW). Tyto stroje mají na rotoru tlumič ve tvaru klecového vinutí nakrátko, takže se rozbíhají jako asynchronní motor nakrátko

(po rozběhu na asynchronní otáčky se přivede ss proud do rotoru a motor je vtažen do synchronizmu).

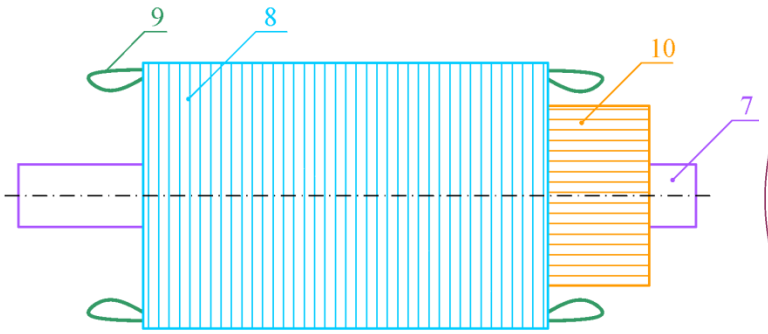
3.8. Synchronní kompenzátor

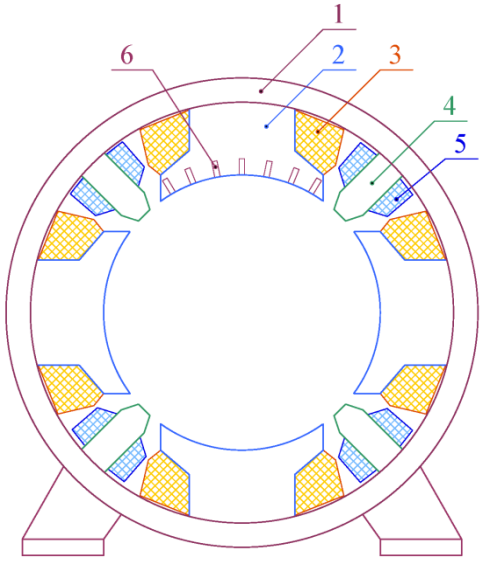
Na rozsáhlé sítě velkých výkonů se na vhodných místech připojí synchronní kompenzátory o výkonu až 100 MVA, což jsou synchronní motory běžící naprázdno. Většinou bývají přebuzeny, takže pracují s kapacitním účiníkem, můžou však pracovat i s účiníkem induktivního charakteru, tedy podbuzeny. Tyto stroje tedy pouze dodávají (odebírají) do sítě jalovou energii.

4. STEJNOSMĚRNÉ STROJE

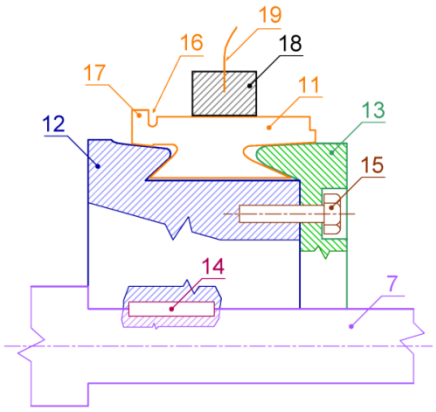
4.1. Konstrukční uspořádání stejnosměrných strojů

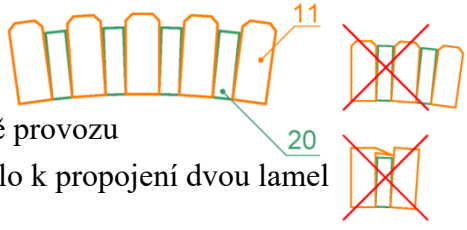
Stejnosměrný stroj se skládá ze statoru a rotoru. Stator je složen s několika částí - v odlité kostře 1 jsou našroubovány hlavní póly 2, na nichž je navinuto tzv. budící vinutí 3 (vinutí hlavních pólů), mezi hlavními póly jsou našroubovány póly pomocné 4 s vinutím pomocných pólů 5. Hlavni póly větších strojů pak mívají navíc ve svých pólových nadstavcích drážky 6 pro uložení kompenzačního vinutí. Dnes se statory menších strojů pro zlevnění výroby vyrábějí z plechů, které jsou vystřiženy tak, že vytvářejí hlavní a pomocné póly a v drážce mezi nimi je uloženo jak vinutí budící, tak i vinutí pomocných pólů (vzájemně odizolované), některé stoje mají opět v pólových nástavcích hlavních pólů drážky pro uložení kompenzačního vinutí. Celý svazek statorových plechů je pak nalisován do kostry. Rotor má tvar válce, je složen ze svazku plechů 8 nalisovaného na hřídeli 7. Na vnějším obvodu rotorových plechů jsou drážky, ve kterých je izolovaně uloženo vinutí 9. iehož začátky a konce jsou vyvedeny na komutátor 10.





Komutátor se skládá z rybinových lamel 11vyrobených z tvrdé mědi, mezi nimi jsou vloženy mezilamelové izolace stejného tvaru vyrobené nejčastěji z mikanitu (slídy). Lamely a izolace jsou staženy stahovací konstrukcí složené ze dvou částí, pevná část 12 je k hřídeli 7 připojena pomocí zajišťovacího pera 14, volná část 13 se k pevné části přitahuje stahovacími šrouby 15. Na lamelách je patrná značka pro opracování 16 a také praporek pro naletování konců vinutí rotoru 17. Na komutátor dosedají uhlíkové kartáče 18 držené nosičem kartáčů upevněným ve statoru a pomocí měděného vývodu 19 propojuje komutátor (vinutí rotoru) s rotorovou svorkovnicí umístěnou na kostře statoru.





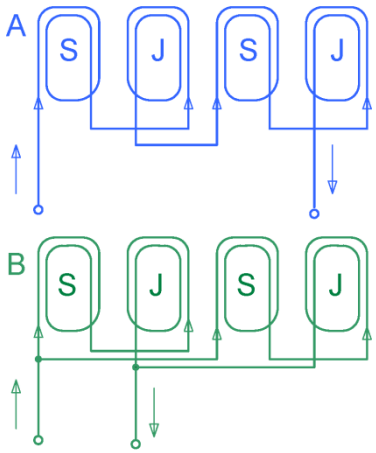
Mezilamelová izolace 20 musí být správně zahloubena (po výrobcem určené době provozu se musí přefrézovat) a lamely musí být zkoseny, aby nedošlo k propojení dvou lamel vlivem „otřepků“.

U menších strojů se vyrábějí komutátory nerozebíratelné. Při jejich výrobě se lamely poskládají do formy a prostor mezi nimi i pod nimi se tlakově zaplní roztaveným termoplastem. Termoplast zde slouží jako mezilamelová izolace i jako stahovací materiál. Jejich velkou výhodou jsou výrazně nižší výrobní náklady, nevýhodou pak nemožnost výměny případně poškozené lamely.

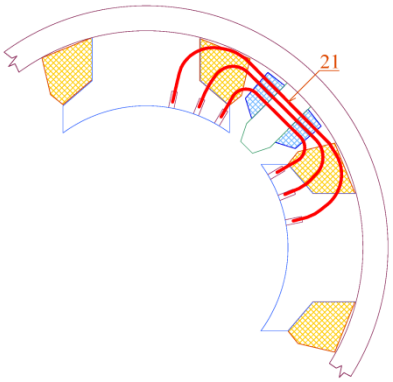
4.2. Vinutí stejnosměrných strojů

Vinutí statoru

Ve statoru jsou umístěny na hlavních pólech budící cívky (3), na pomocných pólech vinutí pomocných pólů (5) a u větších strojů je v drážkách pólových nástavců hlavních pólů uloženo kompenzační vinutí (21). Budící cívky bývají nejčastěji zapojeny do série A, ale mohou být zapojeny i paralelně nebo paralelně ve skupinách B.

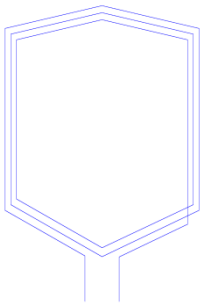


Kompenzační vinutí 21 vložené do drážek pólových nástavců hlavních pólů se umisťuje do prostoru mezi hlavní póly a stejně jako cívky pomocných pólů se jejich jednotlivé cívky zapojují vždy sériově (A). Zapojují se navíc sériově vůči sobě a též sériově k vinutí rotoru (vždy tak, aby magnetické pole pomocných pólů a magnetické po kompenzačního vinutí působilo proti magnetickému poli rotoru).



Vinutí rotoru

Rotory mají většinou dvouvrstvé vinutí a platí pro něj, že drážkový krok musí přibližně odpovídat pólovému dělení, může však být i zkrácený či prodloužený.

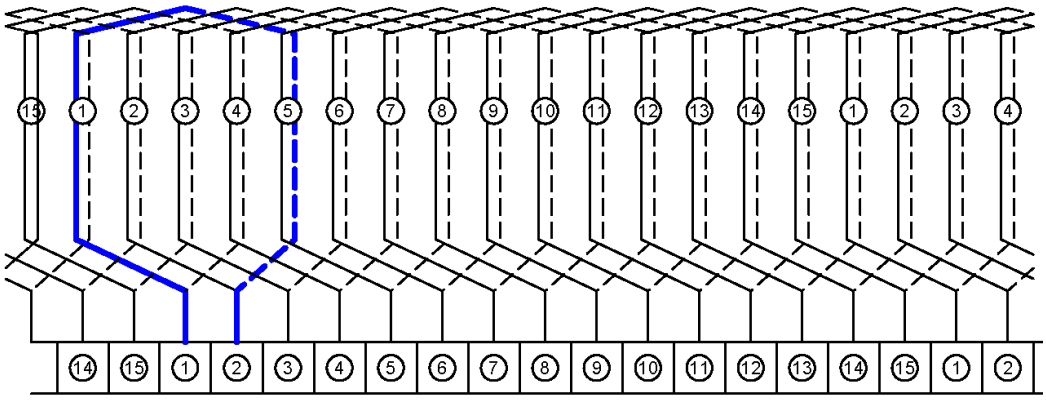


Má-li cívka rotoru takový tvar, že její začátek je připojen na lamele komutátoru sousedící s lamelou, do které je naletován konec této cívky, mluvíme o tzv. smyčkovém vinutí. Počet lamel mezi začátkem a koncem vinutí jedné cívky rotoru se nazývá krok komutátoru a u smyčkového vinutí je tedy vždy roven jedné. Komutátorový krok smyčkového vinutí vypočteme ze vztahu: $y_k = y_1 - y_2 = 1$, kde y_1 je drážkový krok ($y_1 = \frac{Q}{2p}$, popř. $y_1 = \frac{Q}{2p} - n$ pro zkrácený krok, kde Q je počet drážek, 2p počet pólů a n počet drážek, o které je krok zkrácen) a y_2 je krok připojení (krok kartáčů). Bude-li konec cívky připojen na lamelu s o jedno vyšším číslem než začátek této cívky (např. začátek = lamela č. 1, konec = lamela č. 2), jedná se o tzv. nekřížené vinutí (viz obrázek), bude-li

naopak konec na lamele s nižším číslem (začátek = lamela č. 2, konec = lamela č. 1) jedná se o vinutí křížené.

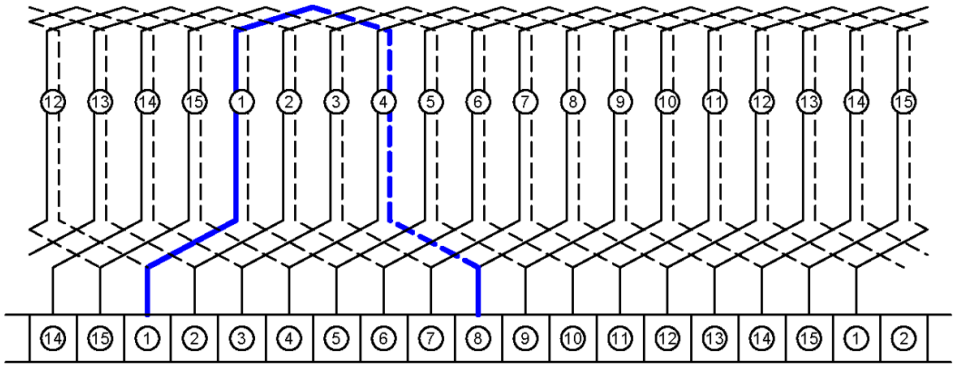
Smyčkové vinutí má vždy počet paralelně zapojených proudových okruhů roven počtu pólů a také počtu kartáčů.

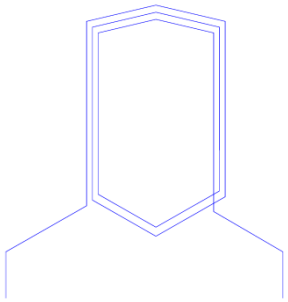
Na obrázku je uveden příklad rotorového smyčkového nekříženého vinutí čtyřpólového stroje s 15 drážkami:



$$y_1 = \frac{Q}{2 \cdot p} = \frac{15}{2 \cdot 2} = 4, \quad y_k = 1.$$

Druhý možný způsob provedení rotorového vinutí je tzv. vinutí vlnové. Komutátorový krok vlnového vinutí je vždy větší než krok drážkový a odpovídá dvojnásobnému pólovému dělení.





Je dán vztahem: $y_k = \frac{K \pm 1}{p}$, nebo $y_k = y_1 + y_2$, (kde K je počet lamel a $y_1 = \frac{Q \pm 1}{2 \cdot p}$).

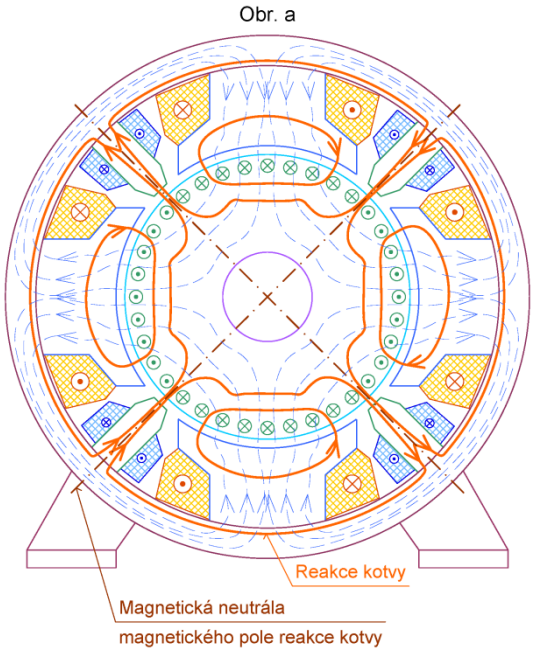
Počet lamel musí být u vlnového vinutí vždy lichý, jinak by konec poslední sériově spojené cívky skončil v lamele, na kterou je připojen začátek první cívky. Budeme-li ve výpočtu drážkového a komutátorového kroku dosazovat znaménko -, bude vinutí nekřížené (viz obrázek) a při dosazení znaménka +, bude křížené.

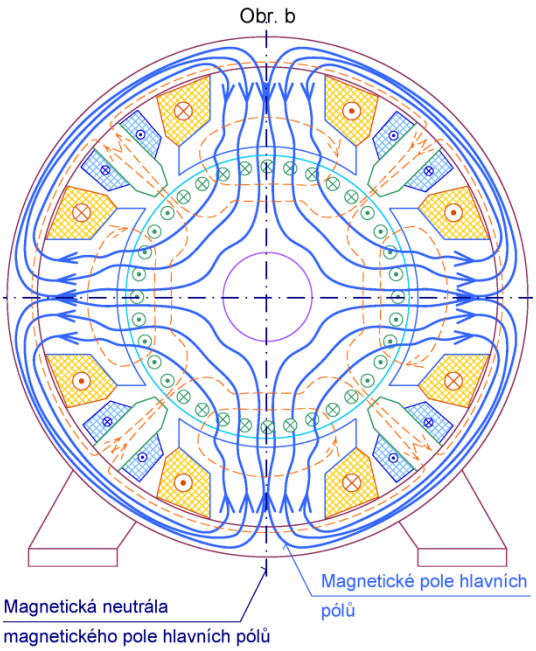
Na obrázku je uveden příklad rotorového vlnového nekříženého vinutí čtyřpólového stroje s 15 drážkami:

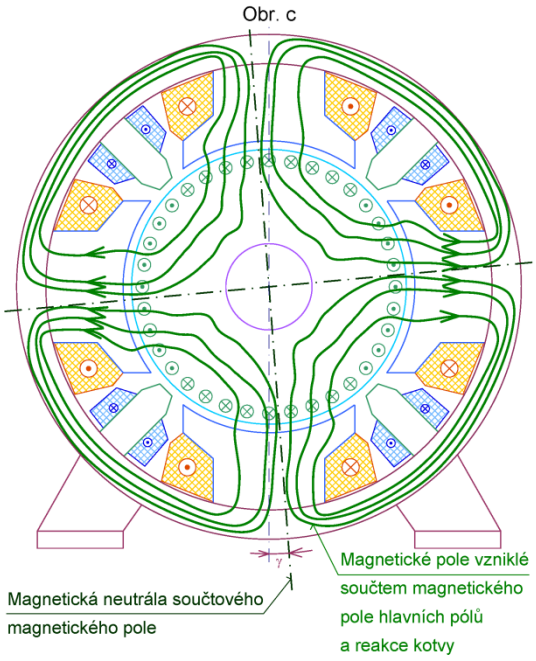
$$y_1 = \frac{Q\text{-}1}{2 \cdot p} = \frac{15\text{-}1}{2 \cdot 2} = 3, \quad y_k = \frac{K \pm 1}{p} = \frac{15\text{-}1}{2} = 7.$$

4.3. Reakce kotvy a její potlačení

Pojmem „reakce kotvy“ nazýváme magnetické pole vytvářené proudem procházejícím vinutím rotoru (obr a). Magnetické indukční čáry jsou kolmé na indukční čáry magnetického pole hlavních pólů (obr b). Obě pole se sčítají a výsledné pole (obr c) má proti magnetickému poli hlavních pólů posunutou magnetickou neutrálu (směr posunutí magnetické neutrály závisí na činnosti stroje, u dynam je posunutá ve směru otáčení, u motorů proti směru).





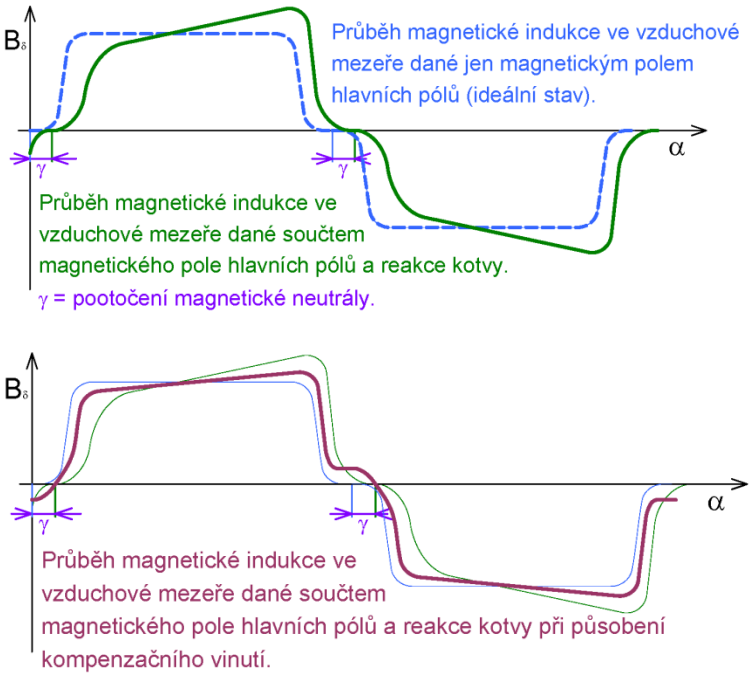


Reakce kotvy je tedy ve stroji nežádoucí, a proto se ji snažíme potlačit. K potlačení slouží pomocné póly zapojené do série s rotorovým vinutím a u větších strojů se navíc do série připojuje i vinutí kompenzační. Jelikož vinutí pomocných pólů (i případné kompenzační vinutí) je zapojeno do série s vinutím rotoru, prochází jím při jakémkoliv zatížení stejný proud, který vytváří stejné magnetické pole jen opačného směru a tím kompenzuje (potlačuje) pole reakce kotvy.

Nestačí-li to k úplnému vyrušení pole reakce kotvy, pak je nutné ještě pootočit kartáče o úhel γ tak, aby ležely v magnetické neutrále.

Při znázornění průběhu magnetické indukce v závislosti na poloze vidíme (stejně jako na obr. c), že je výsledné magnetické pole reakcí kotvy vytláčeno k jedné straně pólového nástavce hlavního pólu, tím zde vzniká magnetické přesycení a tedy deformované nehomogenní pole. Důsledkem deformovaného budícího pole

se indukují v cívkách rotoru různá napětí a to vede k napěťovým rozdílům mezi lamelami komutátoru (tzv. lamelovému napětí) a tím i k jiskření mezi lamelami. Lamelové napětí, jak již bylo řečeno, potlačujeme kompenzačním vinutím, které kromě potláčení reakce kotvy zmenšuje i deformaci budícího pole hlavních pólů. Navíc lamely, které mají mít stejné napětí, vzájemně propojujeme tzv. lamelovými spojkami (propojkami).



4.4. Komutace

Je to proces, při kterém nastává změna směru proudu ve vinutí rotoru při přechodu kartáče z lamely na lamelu (viz obrázek na další straně).

A jelikož tento proces trvá nějakou dobu (nazýváme, ji doba komutace t_k), nastává časová změna proudu a tedy i magnetického toku vyvolaného tímto proudem. Touto změnou se indukuje v komutující cívce tzv. reaktanční napětí. Velikost reaktančního napětí závisí na indukčnosti komutující cívky L_k a na časové změně proudu $\Delta I/\Delta t$:

$$u_k = L_k \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

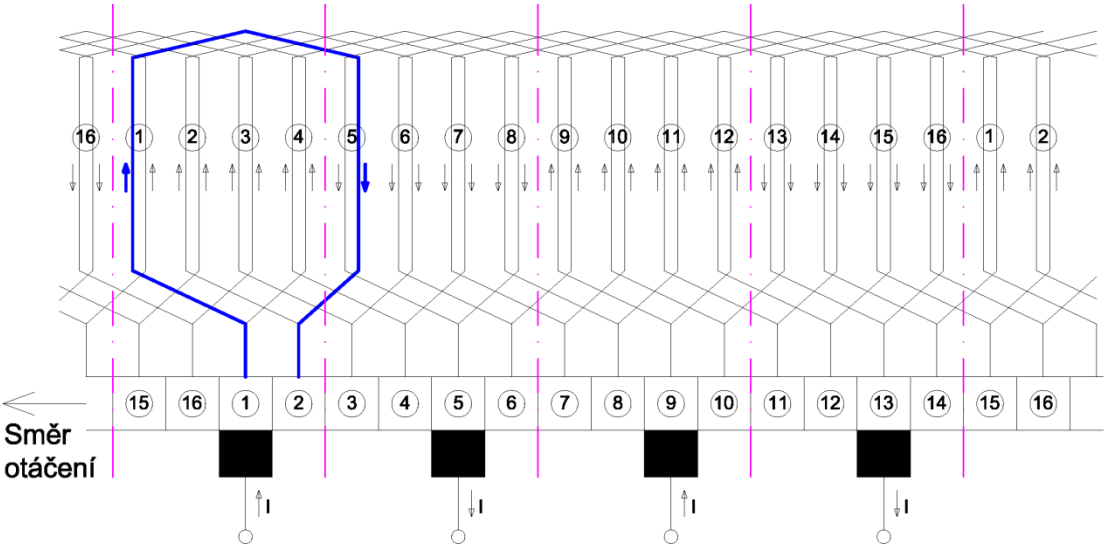
Pokud by se proud během komutace měnil lineárně (ideální průběh komutace) z +I na –I (tedy $2 \cdot I$), velikost komutačního napětí bychom mohli vypočíst ze vztahu:

$$u_k = L_k \cdot \frac{2 \cdot I}{t_k} = 2 \cdot I \cdot L_k \cdot \frac{v_k}{b_k},$$

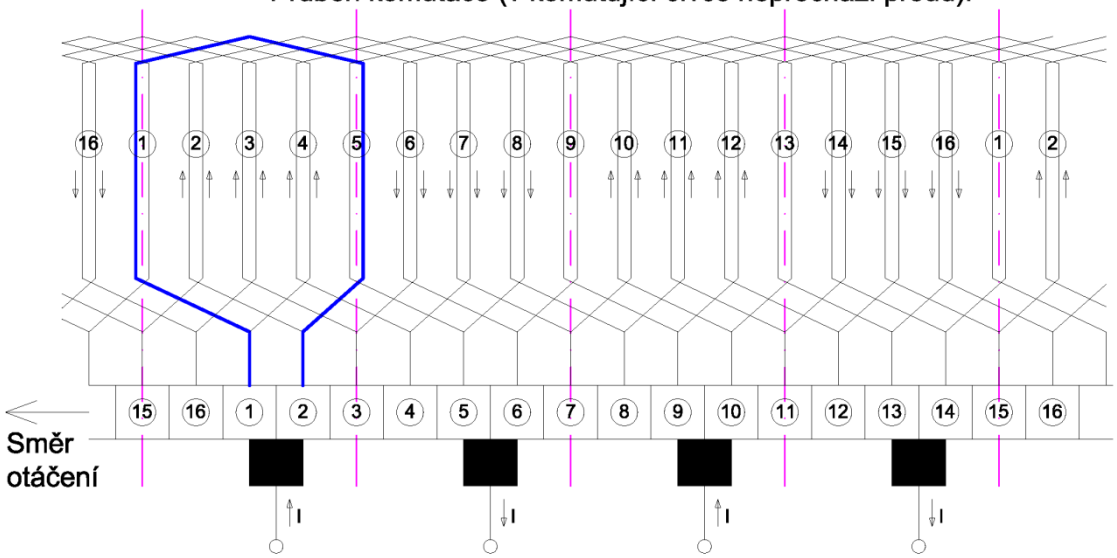
kde v_k je obvodová rychlost rotoru a b_k je šířka kartáče.

Ve skutečnosti však v důsledku Lenzova zákona (reaktanční napětí svými účinky působí proti změně, která jej způsobila) proud klesá ze začátku pozvolněji a největší změna nastává v okamžiku, kdy kartáč opouští lamelu. V tomto okamžiku se tedy i indukuje největší

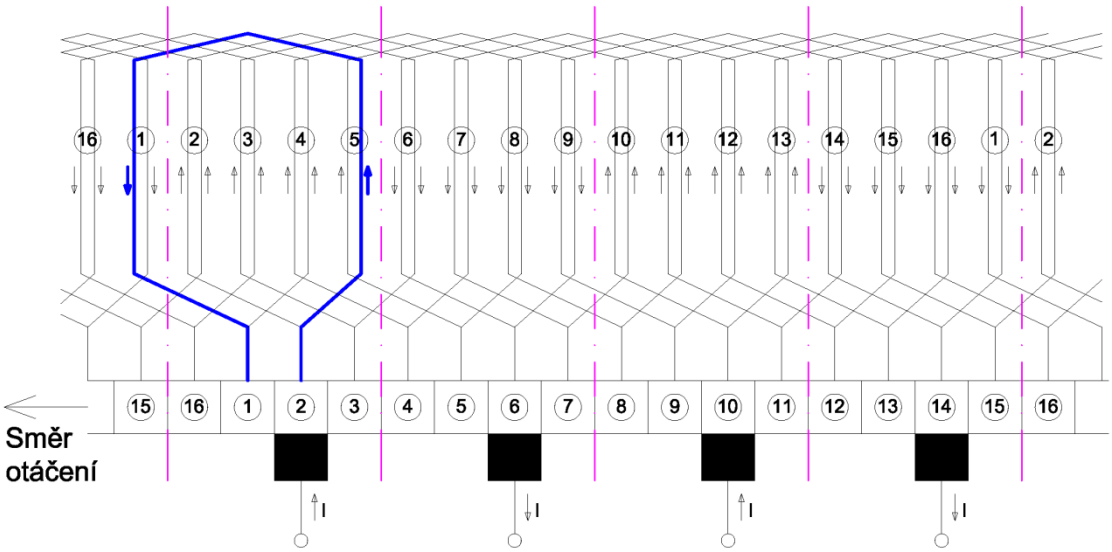
Začátek komutace (čerchovanou čarou je znázorněna magnetická neutrála).

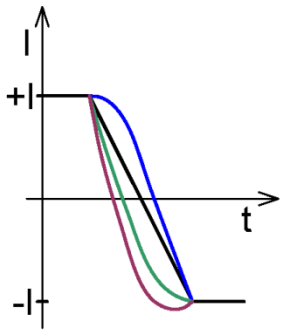


Průběh komutace (v komutující cívce neprochází proud).



Konec komutace (magnetická neutrála se posunula o jednu drážku dál).





Přímková komutace (ideální stav).

Skutečný průběh komutace (bez prostředků ke zlepšení komutace)

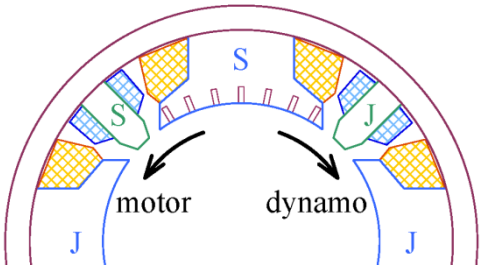
Průběh komutace při použití prostředků ke zlepšení komutace

Průběh při překomutování

reaktanční napětí a dochází k jiskření. Průběh komutace se tedy snažíme upravit tak, aby se v komutující cívce indukovalo i tzv. komutační napětí, které působí proti napětí reaktančnímu. Zlepšení průběhu komutace provádíme u malých strojů pootočením kartáčů, u větších strojů použitím pomocných pólů a u největších strojů použitím pomocných pólů a kompenzačního vinutí.

K vytvoření komutačního napětí pootočením kartáčů dojde, pootočíme-li kartáče až za magnetickou neutrálu, kdy se komutující cívka dostane do vlivu sousedního hlavního pólu. Pootočení kartáčů se používá jen u strojů s malou změnou zatížení (se změnou zatížení se mění i magnetické pole reakce kotvy a tím i potřebný úhel pootočení). Nevýhodou tohoto způsobu je, že při velkém pootočení dochází i ke změně magnetického pole reakce kotvy a tím k zeslabování budícího magnetického pole.

Použití pomocných pólů (popřípadě i kompenzačního vinutí) slouží k potlačení reakce kotvy (viz předchozí kapitola) a navíc můžeme přidáním závitů vinutí pomocných pólů zesílit magnetické pole pomocných pólů a tím i indukovat komutační napětí do komutující cívky. Mohlo by se však stát, že magnetická indukce pomocných pólů bude příliš velká a tím by došlo k tzv. překomutování. Proto se mezi pomocný pól a kostru stroje vkládají plechy, které zmenšují vzduchovou mezeru mezi póly a rotorem (jejich tloušťka se zjišťuje při zkouškách prototypu). Pomocné póly jsou ve statoru zapojeny vždy tak, aby se v komutující cívce indukovalo napětí vyvolávající proud takového směru, jaký bude v cívce po komutaci (u motoru bude za severním hlavním pólem severní pól pomocný, u dynam bude za hlavním pólem severním pomocný pól jižní).

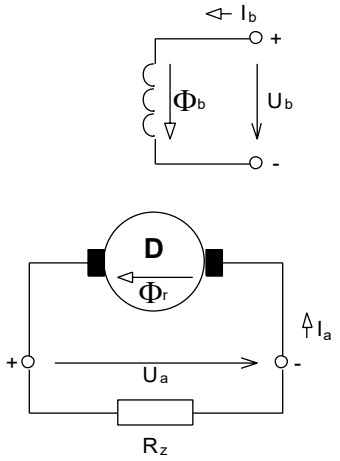


4.5. Dynama

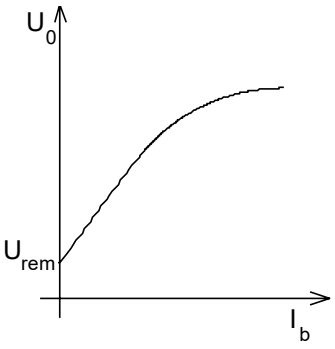
Dynama jsou stejnosměrné stroje, které mění mechanickou energii na energii elektrickou. Rozdělujeme je podle zapojení budícího vinutí vůči vinutí kotvy na dynama s cizím buzením a s buzením vlastním – paralelním (derivačním), sériovým a smíšeným

4.5.1. Cize buzené dynamo

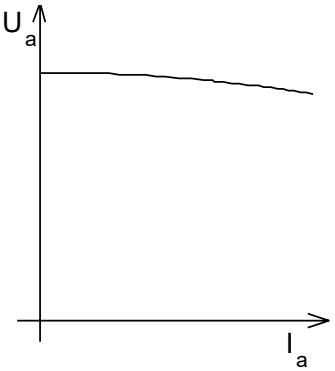
Schéma zapojení



Princip



Budící vinutí hlavních pólů připojíme ke zdroji stejnosměrného napětí, tím začne vinutím procházet proud a vybudí magnetický tok. Budeme-li otáčet rotorem, bude se do vodičů rotoru indukovat střídavé napětí, toto mechanicky usměrňuje komutátor a z kartáčů pak odebíráme napětí stejnosměrné. Velikost odebíraného napětí se reguluje změnou odporu v budícím obvodu nebo přímo změnou budícího napětí.



Charakteristika na prázdno

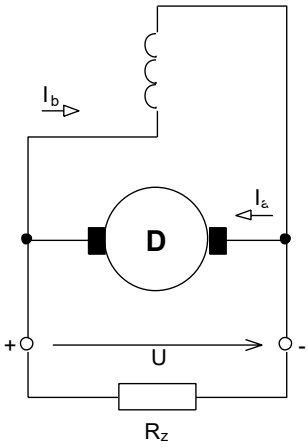
Je závislost svorkového napětí na budícím proudu při konstantních otáčkách a nezatíženém stroji. Jedná se v podstatě o magnetizační charakteristiku, kde U_r je tzv. remanentní napětí odpovídající remanentnímu toku Φ_{br}, tedy toku při nulovém budícím proudu.

Zatěžovací charakteristika

Je to závislost svorkového napětí na zatěžovacím proudu při konstantním budícím proudu a stálých otáčkách. Svorkové napětí mírně klesá se zatížením, neboť se vzrůstajícím proudem vzrůstá i úbytek na kotvě.

Výhody cize buzeného dynama jsou malý pokles napětí při zatížení, snadná regulace napětí

od nuly až po jmenovité napětí a snadná reverzovatelnost (změnou směru otáčení nebo přepólováním buzení). Nevýhodou je nutnost cizího zdroje pro buzení.



4.5.2. Derivační dynamo

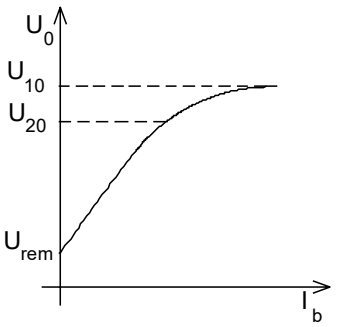
Schéma zapojení

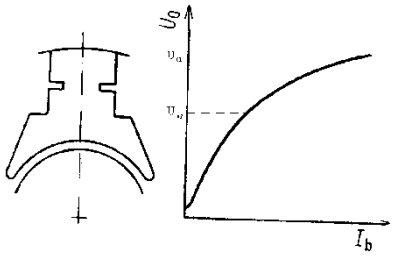
Princip

Když roztočíme rotor dynama, indukuje se nejdříve ve vinutí kotvy malé napětí vlivem remanentního magnetického toku. A jelikož je paralelně ke kotvě připojeno budící vinutí začne jím procházet budící proud. Tok jím buzený musí mít stejný směr jako tok remanentní a tím se bude zvětšovat tok výsledný. Zároveň se tedy zvyšuje i indukované napětí a proto i budící proud až dojde k ustálenému stavu.

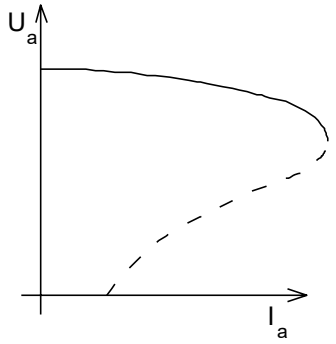
Charakteristika na prázdno

Je opět podobná magnetizační charakteristice a určuje rozsah řízení napětí od tzv. stropního napětí U_{10} při $R_b = 0$ až po minimální hodnotu danou zlomem charakteristiky U_{20} (zvětšení rozsahu řízení napětí se dá upravit poklesem zlomu charakteristiky např. zářezy do magnetického obvodu hlavních pólů)



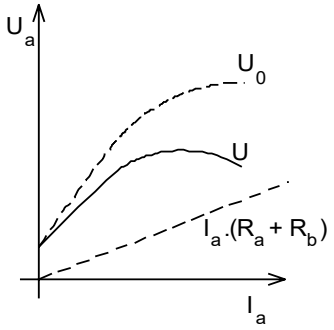


Zatěžovací charakteristika



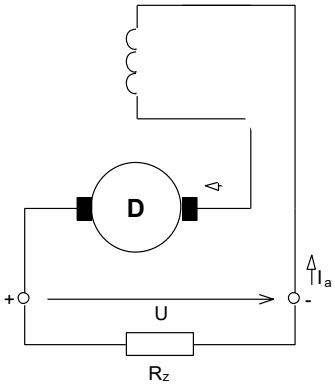
Zatěžovací charakteristika zpočátku klesá o něco víc než u cize buzeného dynama, protože s poklesem svorkového napětí se zároveň zmenšuje i budící proud a tím i budící magnetický tok. Při určité hodnotě zatěžovacího proudu dojde k odbuzení neboť většina proudu půjde do zátěže a budící proud bude malý, tím dojde k poklesu budícího magnetického toku, poklesu napětí a tím i proudu. Proud nakrátko je tedy velice malý (často menší než proud jmenovitý) a říkáme, že derivační dynamo je zkratuvzdorné.

Výhodou tohoto dynama je, že nepotřebuje cizí zdroj napětí při dostatečné tvrdosti zatěžovací charakteristiky a jeho zkratuvzdornost. Nevýhodou je horší možnost řízení napětí.



4.5.3. Dynamo sériové

Schéma zapojení



Princip

Zatěžovací proud je zde i proudem budícím, a dokud není připojena zátěž, nemůže obvodem procházet proud a dynamo se nenabudí. Po propojení obvodu se začne vlivem remanentního toku indukovat do rotoru malé napětí, které bude usměrňováno pomocí komutátoru a kartáčů.

Charakteristika na prázdno

Nedá se zjistit, neboť naprázdno toto dynamo nefunguje a proto se zjišťuje měřením s buzením připojeným na cizí zdroj.

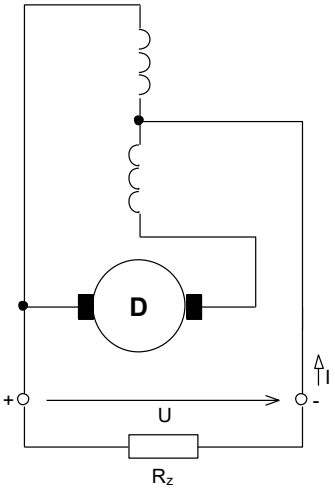
Zatěžovací charakteristika

Zatěžovací charakteristika se zjišťuje odečtem úbytků napětí na odporu rotoru a odporu buzení od charakteristiky naprázdno. Budeme-li zvyšovat odebíraný proud, bude se zvětšovat i buzení a tím poroste i svorkové napětí. Nárůst napětí přestane v okamžiku, kdy začne převládat úbytek napětí na odporu rotoru a buzení.

Napětí tohoto dynama výrazně kolísá se zatížením, a proto se v podstatě nepoužívá. Je vhodné jen pro svařování a proto mu též říkáme dynamo svařovací.

4.5.4. Dynamo se smíšeným buzením

Schéma zapojení



Princip

Buzení mají rozděleno na dvě části, jedna část je zapojena ke kotvě sériově a druhá paralelně. Podle způsobu zapojení máme dynama kompaundní, u kterého je celkový budící magnetický tok součtem magnetických toků sériové a paralelní části buzení, dynama překompaundované, které má větší počet závitů sériové části buzení a protikompaundní u kterého budící toky sériové a paralelní části působí proti sobě.

Zatěžovací charakteristika

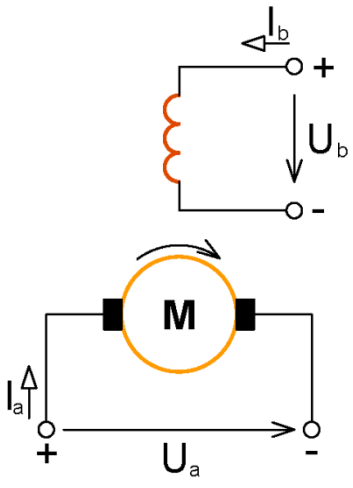
Ze zatěžovací charakteristiky kompaundního dynama (*b*) je patrné, že sériová část buzení kryje se zvětšující se zátěží úbytky napětí a v oblasti menších odebíraných proudů je napětí dokonce vyšší než napětí naprázdno (na rozdíl od charakteristiky *a* derivačního dynama). U překompaundovaného dynama (*c*) dokonce napětí s rostoucí zátěží stoupá. Charakteristika (*d)* představuje tzv. nedokompaundované dynamo tedy dynamo s menším počtem sériových závitů. Protikompaundní dynamo (e) se naopak se zvětšující se zátěží odbuzuje a napětí výrazně klesá (druhý typ svařovacího dynama).

4.6. Motory

Motory jsou stejnosměrné stroje, které mění elektrickou energii na energii mechanickou. Rozdělujeme je stejně jako dynama podle zapojení budícího vinutí vůči vinutí kotvy na motory s cizím buzením a s buzením vlastním – paralelním (derivačním), sériovým a smíšeným

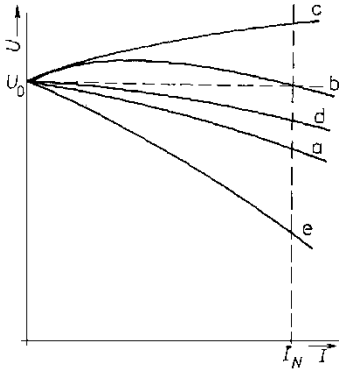
4.6.1. Cize buzený motor

Schéma zapojení



Princip činnosti

Připojíme-li na cívky hlavních pólů zdroj stejnosměrného napětí, začne jimi protékat stejnosměrný proud, který vytvoří statické magnetické pole. Připojíme-li zároveň vinutí rotoru (přes komutátor a kartáče) ke zdroji stejnosměrného napětí, bude jím procházet (přes kartáče a komutátor) proud. A jelikož vodičem rotoru nacházejícího se v magnetickém poli hlavních pólů prochází proud, bude na vinutí

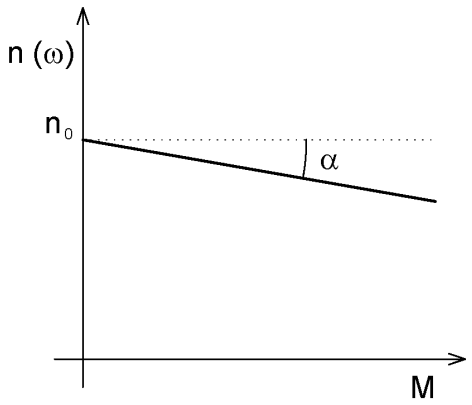


rotoru působit síla (Flemingovo pravidlo levé ruky), která rotorem pohne a pootočí jej. Zároveň komutátor s kartáči změní směr proudu ve vinutí rotoru (dojde ke komutaci) a rotor se opět pootočí. Komutátor tedy zajistí, že pod jižním pólem statoru bude vinutím rotoru procházet opačný proud než pod statorovým pólem severním a rotor se bude otáčet, tzn., že komutátor s kartáči pracuje jako rotační střídač.

Otáčková charakteristika

Je závislost otáček motoru na momentu stroje. U dobře kompenzovaného stroje (Φ se se zatížením nemění) se jedná o přímku se sklonem daným odporem kotvy. Pro určení tvaru otáčkové charakteristiky vycházíme z napěťové rovnice $U_a = U_i + R_a \cdot I_a$, kde U_i je indukované napětí a je dáno vztahem $U_i = C_1 \cdot \Phi \cdot \omega$, kde C_1 je konstrukční konstanta stroje, Φ je budící magnetický tok a ω je úhlová rychlost. Za indukované napětí dosadíme do napěťové rovnice $U_a = C_1 \cdot \Phi \cdot \omega + R_a \cdot I_a$ a poté ji celou vynásobíme proudem procházejícím rotorem, tím dostaneme rovnici výkonovou $U \cdot I_a = I_a \cdot C_1 \cdot \Phi \cdot \omega + R_a \cdot I_a^2$, kde $U \cdot I_a$ představuje elektrický příkon, $R_a \cdot I_a^2$ Jouleovy tepelné ztráty ve vinutí rotoru a $I_a \cdot C_1 \cdot \Phi \cdot \omega$ je mechanický výkon na hřídeli motoru. Ten je dán také základním vztahem $P = M_h \cdot \omega$. Z rovností těchto dvou výrazů si vyjádříme proud rotoru

$I_a \cdot C_1 \cdot \Phi = M_h \cdot \omega \Rightarrow I_a = \frac{M_h \cdot \omega}{C_1 \cdot \Phi \cdot \omega} = \frac{M_h}{C_1 \cdot \Phi}$. Za proud rotoru dosadíme do napěťové rovnice



$U = C_1 \cdot \Phi \cdot \omega + R_a \cdot \frac{M_h}{C_1 \cdot \Phi}$. Z této rovnice vyjádříme úhlovou rychlost v závislosti na momentu

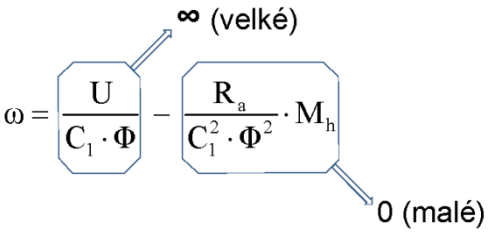
$C_1.\Phi.\omega = U - R_a \cdot \frac{M_h}{C_1 \cdot \Phi}$, $\omega = \frac{U - R_a \frac{M_h}{C_1 \cdot \Phi}}{C_1 \cdot \Phi}$,

$\omega = \frac{U}{C_1 \cdot \Phi} - \frac{R_a}{C_1^2 \cdot \Phi^2} \cdot M_h$ (obecně $y = k_0 - k_1 \cdot x$), jedná se o rovnici přímky se směrnicí (sklonem) $\text{tg}\,\alpha = \frac{R_a}{C_1^2 \cdot \Phi^2}$ (na svislou osu vynášíme místo úhlové rychlosti přímo otáčky dle přepočtu $n = 60 \cdot \frac{\omega}{2 \cdot \pi}$). Dosadíme-li do rovnice stav bez zátěže, tedy $M_h = 0$, pak dostaneme úhlovou rychlost (otáčky) naprázdno $\omega_0 = \frac{U}{C_1 \cdot \Phi}$.

POZNÁMKA:

Rovnice přímky ve tvaru: $y = k_0 - k_1 \cdot x$, říká, že přímka protíná osu y v bodě k_0 a že je klesající (-) se sklonem odpovídajícím k_1 (tg α = k_1).

Z charakteristiky je vidět, že záběrný moment (moment při nulových otáčkách) by byl obrovský, ale v praxi jej můžeme využít jen u motorů do 1 kW, neboť moment je úměrný proudu procházejícímu rotorovým vinutím ($M \sim I_a$) a motor s větším výkonem než 1 kW by byl příliš tepelně namáhán a došlo by k jeho zničení (spouštění viz dále). Z rovnice otáčkové charakteristiky je také patrné, že při chodu naprázdno nebo s jen velice malým zatížením by se motor při odpojení budícího zdroje (odbuzení) roztočil na obrovské otáčky a mohlo by dojít k mechanickému poškození vlivem odstředivých sil.



Další nevýhodou cize buzeného motoru je nutnost použití dvou zdrojů napětí.

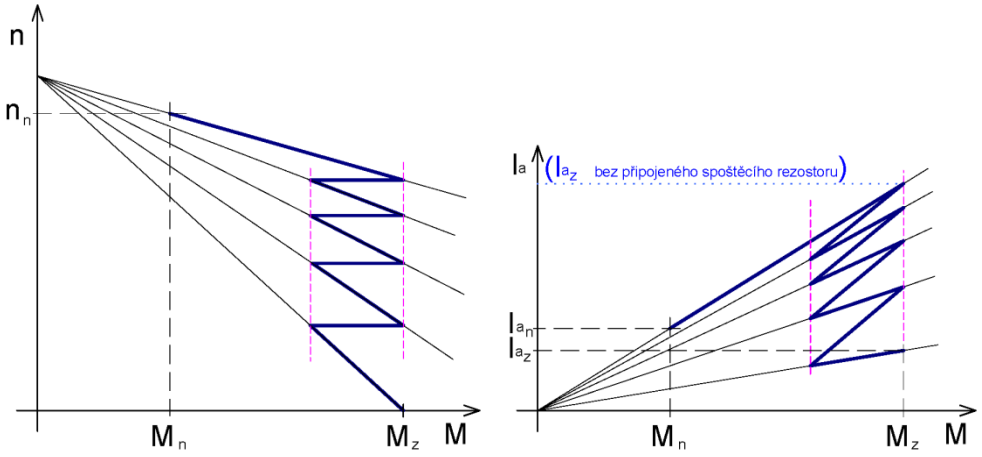
Výhodou je pak snadná reverzovatelnost (změna směru otáčení) přepólováním jednoho ze zdrojů (častěji reverzujeme v obvodu rotoru), včetně možnosti reverzačního brždění a také snadná regulace otáček změnou napětí na rotoru.

Spouštění

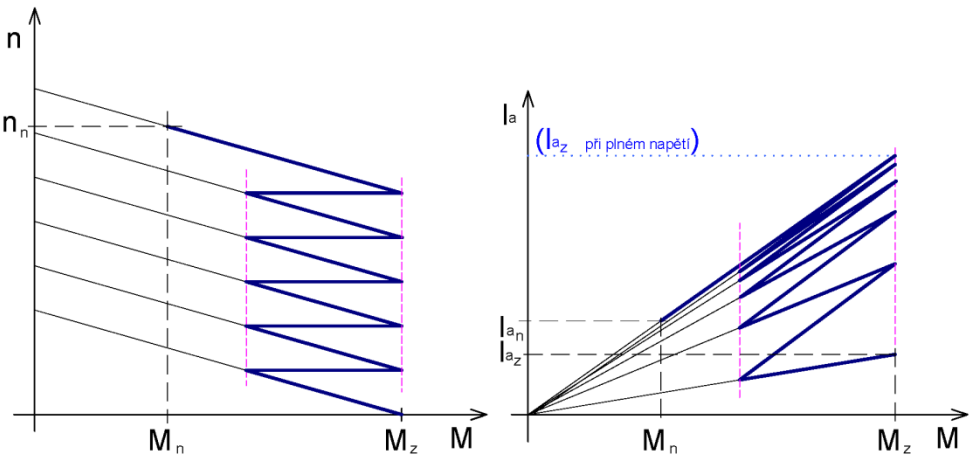
Spouštěním motoru se rozumí jeho roztočení z klidového stavu. V tomto okamžiku nastává velký proudový odběr, který musíme často omezovat.

Stejnosměrné cize buzené motory se spouští tak, že se nejdříve připojí zdroj napětí k budícímu vinutí, nastaví se příslušný budící proud a poté se připojí zdroj napětí k vinutí rotoru. Jelikož jsme však omezeni velikostí záběrného proudu, můžeme takto spouštět jen motory do výkonu cca 1 kW. U motorů větších musíme omezit velikost záběrného proudu buď spouštěcím rezistorem zapojeným sériově k vinutí rotoru, nebo snížením napětí rotorového zdroje.

Při *spouštění rezistorem do série s kotvou* se nejdříve nastaví největší hodnota odporu, tomu odpovídá záběrný proud a také sklon charakteristiky (vysvětleno v kapitole regulace otáček), poté se postupně přepínají jednotlivé stupně rezistoru, čímž se snižuje hodnota odporu a motor přechází na odpovídající otáčkovou a proudovou charakteristiku. Po roztočení na jmenovité otáčky se může rotorový spouštěč odpojit (neslouží-li zároveň k regulaci otáček).



Při *spouštění regulovatelným zdrojem napětí* nejdříve nastavíme velikost napětí na minimální hodnotu a poté napětí zvyšujeme. Máme-li zdroj s plynulou regulací napětí, pak po rozběhu zvyšujeme napětí a tím i otáčky při téměř konstantním momentu a proud narůstá přímo úměrně s napětím. Máme-li zdroj se „skokovou“ regulací napětí, budeme přepínat postupně na vyšší hodnoty napětí a motor bude přecházet na odpovídající otáčkovou (vysvětleno v kapitole regulace otáček) a proudovou charakteristiku.



Regulace otáček

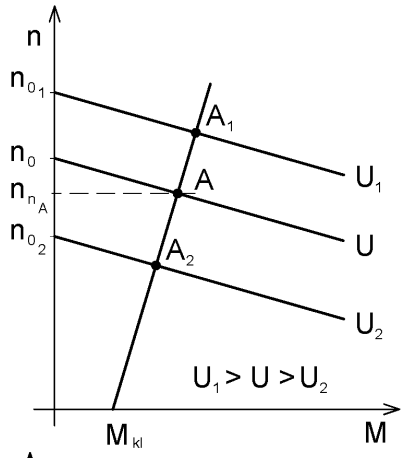
Regulací otáček se rozumí úmyslná změna otáček rotoru (ne změna jiným vlivem například náhlou změnou zatížení).

Otáčky stejnosměrného cize buzeného motoru lze regulovat (jak vyplývá z rovnice otáčkové charakteristiky: $\omega = \frac{U}{C_1 \cdot \Phi} - \frac{R_a}{C_1^2 \cdot \Phi^2} \cdot M_h$) změnou napětí na rotoru, zařazením rezistoru do série s rotorovým vinutím, nebo změnou velikosti budícího proudu (budícího toku).

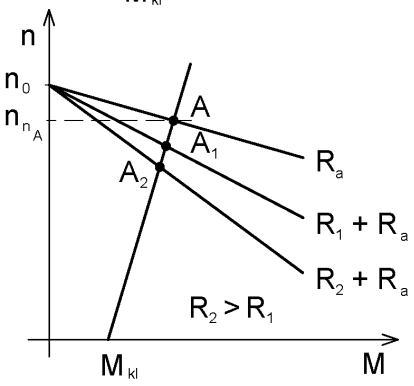
POZNÁMKA:

Pro posouzení změny otáček je v obrázcích použita tzv. kalandrová charakteristika pracovního mechanizmu a jsou zde vyznačeny pracovní body a v průsečících charakteristik.

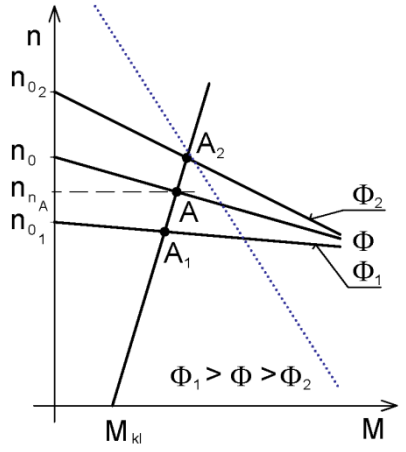
Regulací otáček změnou napětí na rotoru měníme jen otáčky naprázdno (průsečík s osou otáček), neboť napětí je v rovnici otáčkové charakteristiky jen v prvním členu, sklon charakteristiky zůstává stejný (většímu napětí odpovídají vyšší otáčky $U_1 < U < U_2$). Tato regulace (používá se i pro spouštění) je dnes nejpoužívanější díky polovodičovým měničům.



Regulace otáček rezistorem do série s vinutím rotoru umožňuje jen snižování otáček, neboť zapojením rezistoru do série s vinutím kotvy se pouze zvýší sklon charakteristiky (zvětší se hodnota druhého členu rovnice otáčkové charakteristiky a tedy i směrnice tg α), otáčky naprázdno se nemění ($R_1 < R_2$).



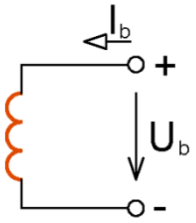
Regulace otáček buzením nastává při změně magnetického toku vytvářeného proudem procházejícím budícím vinutím. Změnou budícího toku Φ se mění obě části rovnice a jelikož je budící tok ve jmenovateli, budou se při zvýšení budícího magnetického toku zmenšovat otáčky naprázdno (první člen rovnice) a zároveň se bude zmenšovat i sklon charakteristiky (druhý člen rovnice = tg α). Naopak při snížení magnetického toku se budou otáčky naprázdno zvyšovat, ale bude se zvyšovat i sklon charakteristiky



($\Phi_1 > \Phi > \Phi_2$). Tato regulace má jen omezený rozsah, protože budící tok lze měnit jen velice omezeně v okolí ohybu magnetizační charakteristiky.

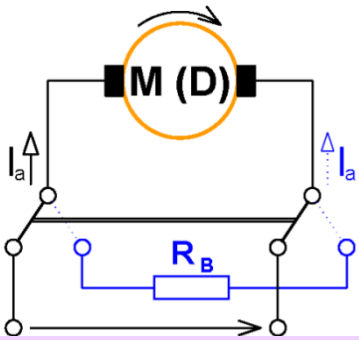
Při malém zatížení však nikdy nesmí dojít k přerušení napájení vinutí hlavních pólů, neboť by magnetický tok poklesl na hodnotu remanentního toku a otáčky by neúměrně vzrostly (viz modrá tečkovaná čára).

Brzdění



Brzděním se rozumí úmyslné zpomalení nebo úplné zastavení rotoru.

Cize buzené motory mohou být brzděny buď generátoricky nebo protiproudem. Přičemž do generátorického chodu přejde motor při brzdění do odporu nebo při brzdění rekuperací.



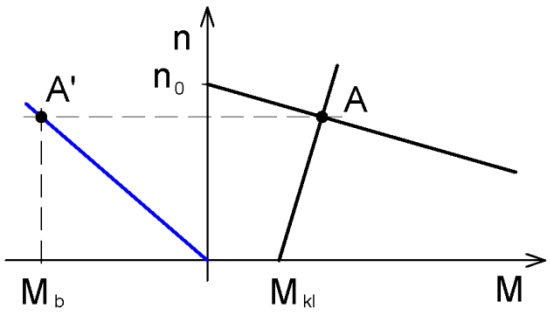
Brzdění do odporu – rotor odpojíme od zdroje a připojíme jej k brzdnému rezistoru. Točivá (mechanická) energie rotoru se ve stroji mění v energii elektrickou, tedy motor se stává dynamem a elektrická energie se v brzdném rezistoru mění v teplo ($R \cdot I^2$).

POZNÁMKA:

Pro zopakování: Princip činnosti cize buzeného dynama:

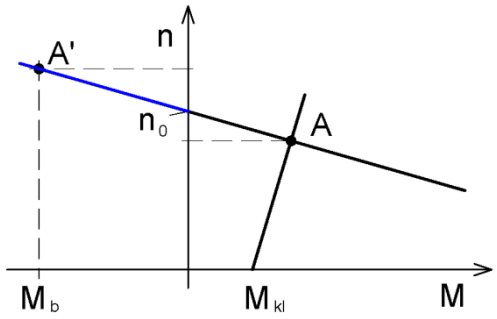
Budící vinutí hlavních pólů je připojeno ke zdroji stejnosměrného napětí, budícím vinutím prochází proud a ten vybudí statické magnetické pole. Otáčíme-li rotorem, bude se do vodičů rotorového vinutí indukovat střídavé napětí, které mechanicky usměrňuje komutátor a z kartáčů pak odebíráme napětí stejnosměrné.

Po odpojení motoru od zdroje je první člen rovnice otáčkové charakteristiky roven nule ($\frac{U}{C_1 \cdot \Phi} = 0$) a rovnice otáčkové charakteristiky stroje je po připojení k brzdnému rezistoru dána rovnicí: $\omega = -\frac{R_a + R_B}{C_1^2 \cdot \Phi^2} \cdot M_h$. Jedná se tedy o rovnici přímky, která má větší sklon, než původní charakteristika a prochází počátkem souřadnic. Moment rotujících částí se stává momentem zpomalovacím (znaménko mínus). Pracovní bod A tedy přejde z pracovní charakteristiky na charakteristiku zpomalovací do bodu A‘ (zanedbáme-li pokles otáček v době přepínání) a bude brzděn brzdným momentem M_b. Brzdný moment se bude zmenšovat se zmenšujícími se otáčkami.

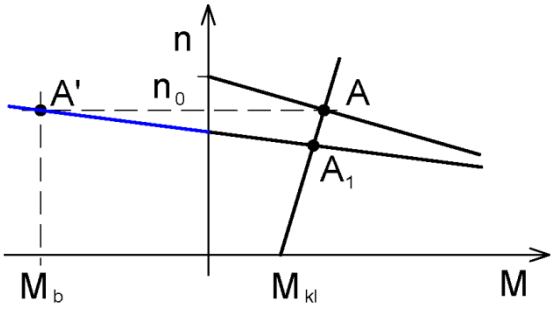


Brzdění rekuperací – nastává tehdy, jsou-li otáčky rotoru větší než otáčky naprázdno a velikost napětí indukovaného do vinutí rotoru je větší než napětí zdroje připojeného k rotoru (zapojení motoru se nemění). Motor přechází do generátorického chodu a vrací elektrickou energii do sítě, přičemž je nutné, aby napájecí zdroj tuto energii uměl přijmout. Elektrickou energii přijme akumulátor, který se dobíjí, dynamo, které se stane motorem, ten roztáčí poháněcí asynchronní motor nad synchronní otáčky a on pak vrací energii do sítě, nebo řízený usměrňovač, který přejde do střídačového chodu (neřízený ani polořízený usměrňovač energii nepřijme stejně jako baterie).

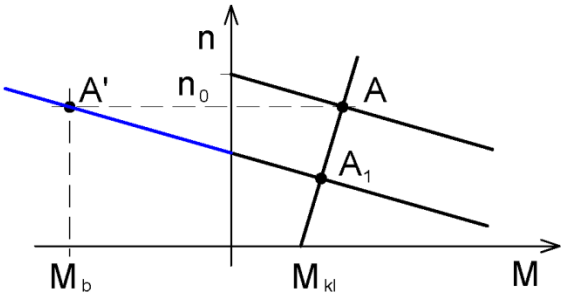
K rekuperaci tedy může dojít:



- *při mechanickém zrychlení rotoru* pracovním strojem například při spouštění břemene u zdvihacích zařízení nebo při jízdě trakčního vozidla s kopce. Pracovní bod A přejde po stejné charakteristice do bodu A' odpovídajícímu vyšším otáčkám a je brzděn zpět brzdným momentem M_b. Brzdný moment se bude s klesajícími otáčkami zmenšovat, až se stane opět momentem hnacím. Motor ale bude dále zpomalovat, neboť hnací moment bude menší než moment zátěžný pracovního mechanizmu (viz kapitola statická stabilita pohonu). Otáčky motoru se ustálí znovu v pracovním bodě A.



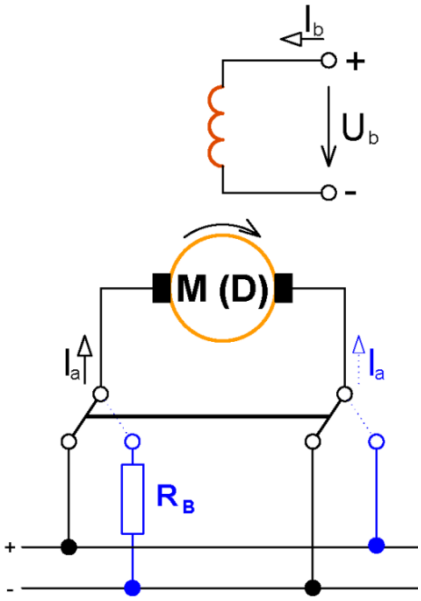
- *při zvýšení budícího toku*. Pracovní bod přejde na charakteristiku odpovídající vyššímu budícímu proudu (nižší n_0 a menší sklon charakteristiky) do pracovního bodu A' a bude brzděn momentem M_b. Brzdný moment se bude s klesajícími otáčkami zmenšovat, až se stane opět momentem hnacím. Motor, ale bude dále zpomalovat, neboť hnací moment bude menší než moment zátěžný pracovního mechanizmu. Otáčky motoru se ustálí v pracovním bodě A_1.

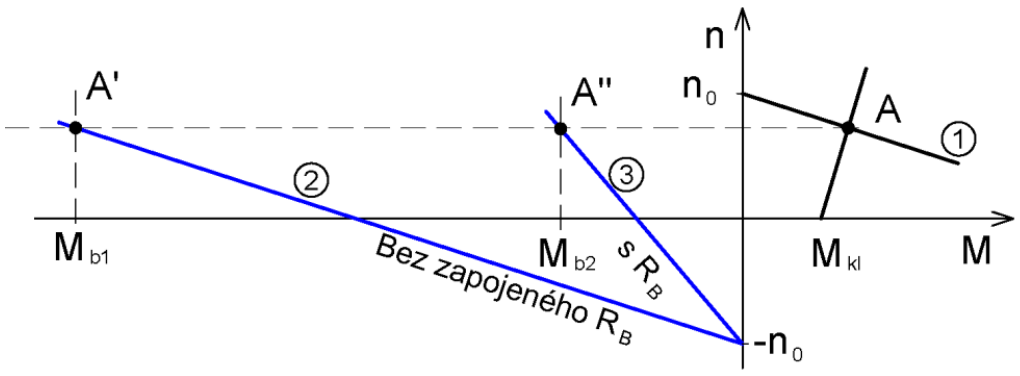


- *při snížení napájecího napětí* například při regulaci otáček napětím. Pracovní bod přejde na charakteristiku odpovídající tomuto napětí (do bodu A') a bude brzděn momentem M_b, a stejně jako v předchozím případě se otáčky motoru nakonec ustálí v pracovním bodě A_1).

Rekuperací se tedy motor pouze přibrzďuje, pokud by měl být motor úplně zastaven muselo by se snižovat napětí až na hodnotu, která by odpovídala minimálním otáčkám, a poté by se motor odpojil a nechal by se doběhnout.

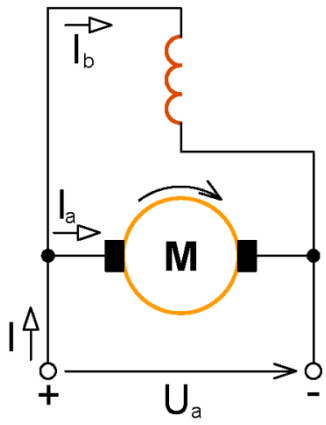
Brzdění reverzací – motor začne brzdit reverzací neboli protiproudem, když jej přepneme na opačný smysl točení, tady přepólujeme napájecí napětí rotoru (častěji) nebo napájecí napětí buzení. Po přepólování zdroje bude jeho napětí ve stejném smyslu jako napětí indukované, bude se s ním sčítat a obvodem začne procházet velký proud ($I_a = \frac{U+U_i}{R_a}$), který může dosáhnout až dvojnásobku jmenovitého proudu. Do obvodu se proto zařazuje brzdný rezistor, jehož odpor však nesmí být příliš velký, neboť čím bude větší hodnota odporu, tím větší bude sklon charakteristiky a tím menší bude brzdný moment (musíme najít kompromis mezi velikostí brzdného momentu a velikostí procházejícího proudu). Pracovní bod (A) se z charakteristiky ① dané rovnicí otáčkové charakteristiky ($\omega = \frac{U}{C_1 \cdot \Phi} - \frac{R_a}{C_1^2 \cdot \Phi^2} \cdot M_h$) při reverzaci bez zapojeného rezistoru přesune na charakteristiku ②do pracovního bodu A', která je dána rovnicí $\omega = -\frac{U}{C_1 \cdot \Phi} - \frac{R_a}{C_1^2 \cdot \Phi^2} \cdot M_h$, má tedy stejný sklon jako přímka ①, ale osu otáček protíná v bodě – n_0. Motor je brzděn brzdným momentem M_{b1}, kterému odpovídá obrovský proud a ten by mohl poškodit vinutí rotoru. Proto se většinou připojuje brzdný rezistor R_B a pracovní bod (A) přejde na charakteristiku ③ danou rovnicí $\omega = -\frac{U}{C_1 \cdot \Phi} - \frac{R_a+R_B}{C_1^2 \cdot \Phi^2} \cdot M_h$ do pracovního bodu A''. Rovnice má větší sklon než přímka ① a osu otáček protíná v bodě – n_0. Brzdný moment se bude (v obou případech) s klesajícími otáčkami zmenšovat, až se rotor zastaví. V tomto okamžiku se musí odpojit zdroj napětí rotoru, protože jinak by se rotor roztočil opačným směrem (odpojit motor můžeme už při nastavených minimálních otáčkách a motor se nechá doběhnout).





4.6.2. Derivační motor

Schéma zapojení



Princip

Po připojení zdroje stejnosměrného napětí na svorky motoru začne procházet proud, který se rozdělí do budícího vinutí (I_b) a zároveň přes komutátor a kartáče do vinutí rotoru (Ia). Proud procházející budícím vinutím vytvoří v hlavních pólech statické magnetické pole. Jelikož vodiči rotoru nacházejících se v magnetickém poli hlavních pólů prochází proud (vytvoří magnetické pole rotoru), bude na ně působit síla, která rotorem pohne a pootočí jej do magnetické neutrály. V neutrále jsou umístěny kartáče a dojde ke komutaci, tedy ke změně směru proudu ve vinutí rotoru. Tím na rotorové vodiče bude působit síla, která opět rotorem pootočí a ten se začne otáčet (komutátor s kartáči pracuje jako rotační střídač).

Tyto motory se používají tam, kde jsou potřeba otáčky nezávislé na zatížení, a které není potřeba moc regulovat.

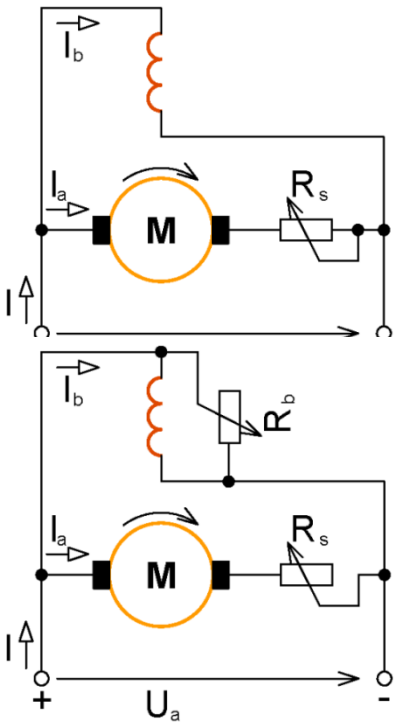
Otáčková charakteristika

Je tvarově téměř stejná jako u motoru s cizím buzením.

Bude-li konstantní budící proud I_b, pak otáčková charakteristika má obdobný tvar (i odvození) jako u cize buzeného motoru. Stejně jako u cize buzeného motoru nesmí při malém zatížení nikdy dojít k přerušení obvodu buzení, neboť by magnetický tok poklesl na hodnotu remanentního toku a otáčky by neúměrně vzrostly.

Spouštění

Tyto motory se spouští jen pomocí proměnného rezistoru zapojeného do série s rotorovým vinutím. Ten bývá navíc dimenzován na trvalý chod a používá se i k regulaci otáček. Spouštění napětím se nepoužívá, protože se se změnou napětí mění samozřejmě i budící proud. Charakteristiky při spouštění jsou stejné jako u cize buzeného motoru.



Regulace otáček

Otáčky derivačního motoru regulujeme proměnným rezistorem zapojeným sériově k vinutí rotoru, případně budícím proudem (regulovaným proměnným rezistorem zapojeným paralelně k budícímu vinutí – jako bočník).

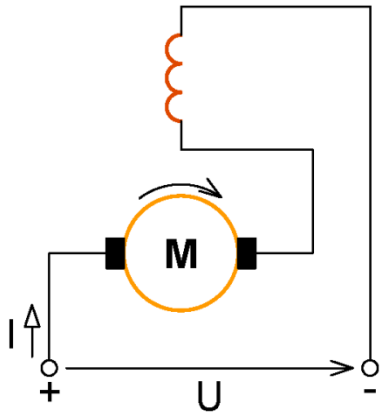
Brzdění

Brzdit derivační motor můžeme úplně stejně jako motor cize buzený, jen při brzdění do odporu se začne při poklesu otáček na malou hodnotu výrazně zmenšovat brzdný moment. Je-li to možné, je tedy lepší se zmenšujícími se otáčkami zmenšovat i velikost brzdného odporu.

4.6.3. Motor sériový

α

Schéma zapojení



Princip

Po připojení motoru ke zdroji napětí začne proud procházet vinutím rotoru (přes kartáče a komutátor) i vinutím hlavních pólů (budícím vinutím). Proud průchodem vinutí hlavních pólů vytvoří ve statoru statické magnetické pole, a jelikož vodiči rotoru prochází stejný proud (nachází se v magnetickém poli hlavních pólů), bude na vodiče rotoru působit síla, která rotorem pohne a pootočí jej do magnetické neutrály. V neutrále jsou umístěny kartáče a dojde ke komutaci, tedy ke změně směru proudu ve vinutí rotoru. Tím na rotorové vodiče bude nadále působit síla stejným směrem a rotor se začne otáčet (komutátor s kartáči pracuje jako rotační střídač).

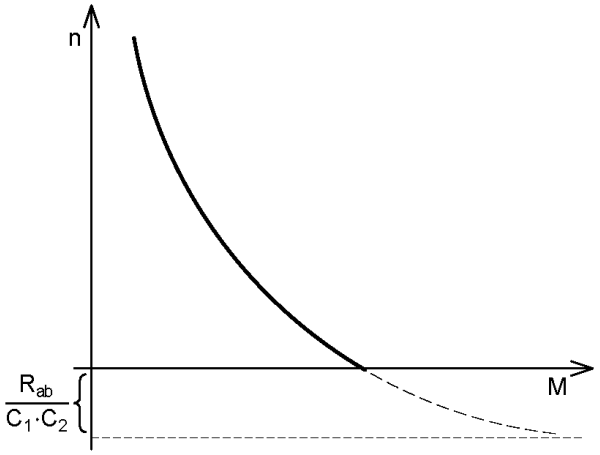
Otáčková charakteristika

Je závislost otáček motoru na momentu stroje. Jedná se v podstatě o hyperbolu, jejíž jednou asymptotou je osa otáček a druhou je rovnoběžka s osou momentu posunutá pod tuto osu. Pro určení tvaru otáčkové charakteristiky vycházíme (stejně jako u cizebuzeného motoru) z napěťové rovnice $U = U_i + R_{ab} \cdot I$, kde R_{ab} je součet odporu vinutí rotoru a vinutí hlavních pólů a U_i je indukované napětí, dané vztahem $U_i = C_1 \cdot \Phi \cdot \omega$, kde C_1 je konstrukční konstanta stroje, $\Phi = C_2 \cdot I$ je budící magnetický tok (není konstantní je dán magnetizační charakteristikou) a ω je úhlová rychlost. Za indukované napětí dosadíme do napěťové rovnice $U = C_1 \cdot C_2 \cdot I \cdot \omega + R_{ab} \cdot I$ a poté ji celou vynásobíme proudem, tím dostaneme rovnici výkonovou $U \cdot I = C_1 \cdot C_2 \cdot I^2 \cdot \omega + R_{ab} \cdot I^2$, kde $U \cdot I$ představuje elektrický příkon, $R_{ab} \cdot I^2$ Jouleovy tepelné ztráty ve vinutí rotoru a $C_1 \cdot C_2 \cdot I^2 \cdot \omega$ je mechanický výkon na hřídeli motoru. Ten je dán také základním vztahem $P = M_h \cdot \omega$. Z rovností těchto dvou výrazů si vyjádříme proud $C_1 \cdot C_2 \cdot I^2 \cdot \omega = M_h \cdot \omega \Rightarrow I^2 = \frac{M_h \cdot \omega}{C_1 \cdot C_2 \cdot \omega} = \frac{M_h}{C_1 \cdot C_2} \Rightarrow I = \sqrt{\frac{M_h}{C_1 \cdot C_2}}$ a dosadíme jej do napěťové rovnice $U = C_1 \cdot C_2 \cdot \sqrt{\frac{M_h}{C_1 \cdot C_2}} \cdot \omega + R_{ab} \cdot \sqrt{\frac{M_h}{C_1 \cdot C_2}}$. Nakonec si z této rovnice vyjádříme úhlovou rychlost v závislosti na momentu $[\omega = f(M_h)]$

$$C_1 \cdot C_2 \cdot \sqrt{\frac{M_h}{C_1 \cdot C_2}} \cdot \omega = U - R_{ab} \cdot \sqrt{\frac{M_h}{C_1 \cdot C_2}}$$

$$\omega = \frac{U}{C_1 \cdot C_2 \cdot \sqrt{\frac{M_h}{C_1 \cdot C_2}}} - \frac{R_{ab} \cdot \sqrt{\frac{M_h}{C_1 \cdot C_2}}}{C_1 \cdot C_2 \cdot \sqrt{\frac{M_h}{C_1 \cdot C_2}}}$$

$\omega = \frac{U}{\sqrt{C_1 \cdot C_2} \cdot \sqrt{M_h}} - \frac{R_{ab}}{C_1 \cdot C_2}$, jedná se o rovnici hyperboly, jejíž jednou asymptotou je osa úhlové rychlosti (otáček $n = \frac{60}{2\pi} \cdot \omega$) a druhou je rovnoběžka s osou momentu posunutá pod tuto osu o $\frac{R_{ab}}{C_1 \cdot C_2}$.



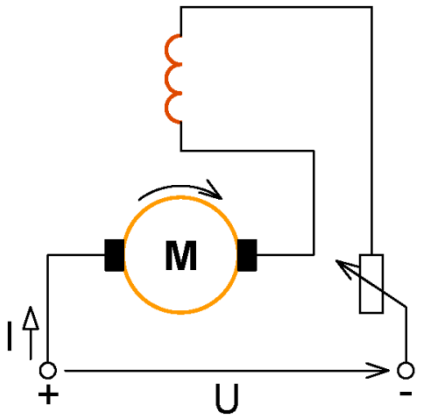
Tyto motory se používají tam, kde je potřeba velkého záběrného momentu (velké obráběcí stroje, trakce, startéry, apod.). Jejich nevýhodou je, že při odlehčení (nulovém zatěžovacím momentu) by jejich otáčky narostly na nekonečno a motor by se zničil odstředivou silou, nesmí se proto zapojovat s řemenovými, řetězovými nebo podobnými převody.

Spouštění

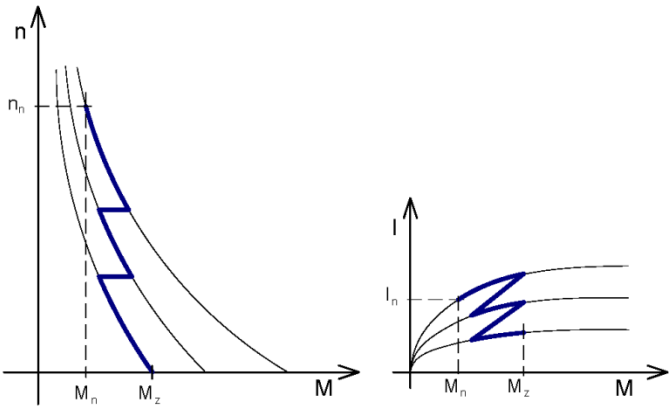
Spouštění sériového motoru se provádí proměnným rezistorem zapojeným do série, nebo regulovatelným zdrojem napětí.

Malé motory můžeme spouštět přímo, ale u motorů větších musíme omezit velikost záběrného proudu buď spouštěcím rezistorem zapojeným sériově k vinutí rotoru, nebo snížením napětí rotorového zdroje.

Při *spouštění rezistorem do série s kotvou* se nejdříve nastaví největší hodnota odporu, tomu odpovídá záběrný proud a také charakteristika (vysvětleno v kapitole regulace otáček), poté se postupně přepínají jednotlivé stupně rezistoru, čímž se snižuje hodnota odporu a motor přechází na odpovídající otáčkovou a proudovou charakteristiku. Po roztočení na jmenovité otáčky se

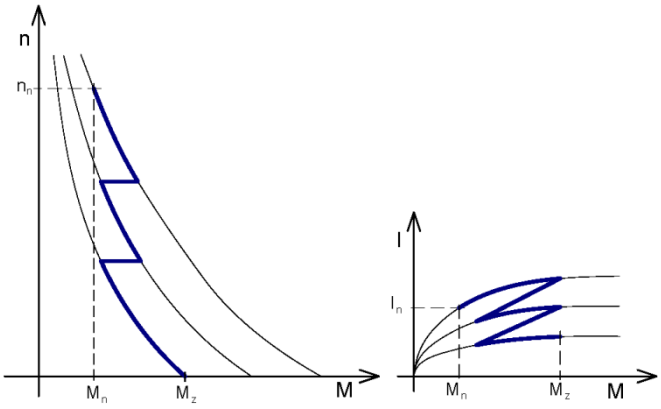


může rotorový spouštěč odpojit (neslouží-li zároveň k regulaci otáček).



Při *spouštění regulovatelným zdrojem napětí* nejdříve nastavíme velikost napětí na minimální hodnotu a poté napětí zvyšujeme.

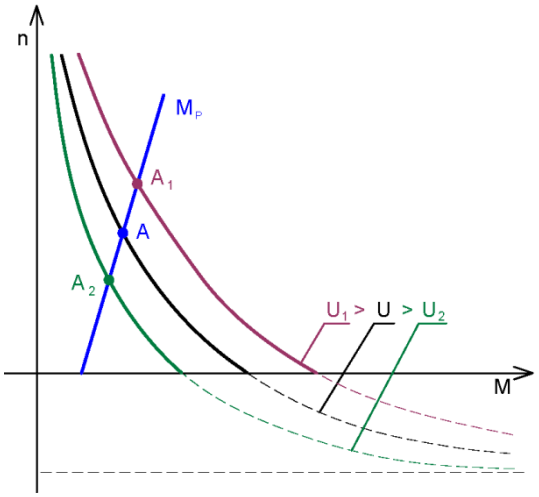
Máme-li zdroj s plynulou regulací napětí, pak po rozběhu zvyšujeme napětí a tím i otáčky při téměř konstantním momentu a proud narůstá přímo úměrně s napětím. Máme-li zdroj se „skokovou“ regulací napětí, budeme přepínat postupně na vyšší hodnoty napětí a motor bude přecházet na odpovídající otáčkovou (vysvětleno v kapitole regulace otáček) a proudovou charakteristiku.



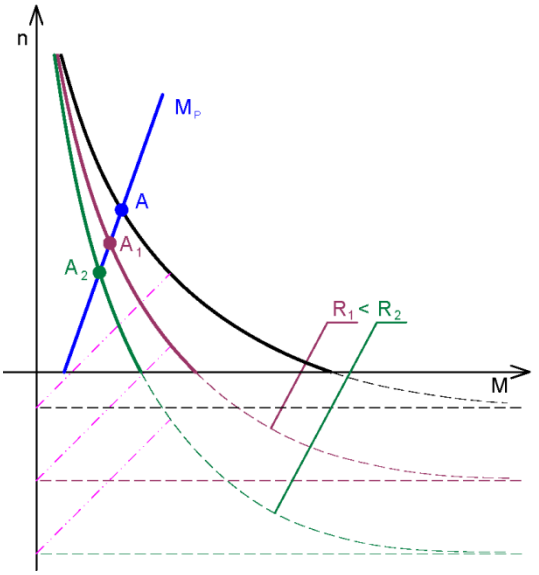
Regulace otáček

Otáčky sériových motorů se dají řídit napětím, odporem zařazeným do série s vinutím rotoru a budícím proudem.

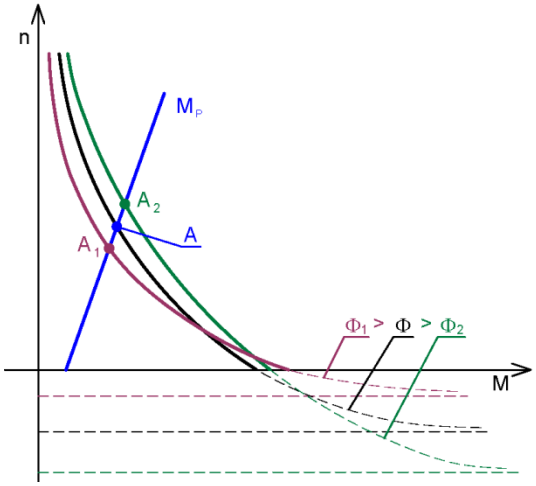
Regulace otáček změnou napětí - změnou napětí se charakteristika jen posouvá dál od průsečíku asymptot (při větším napětí - U_1) nebo blíž k průsečíku asymptot (při menším napětí - U_2), asymptoty charakteristik zůstávají stejné.



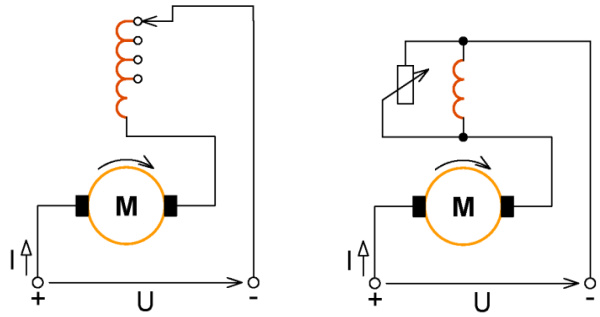
Regulace otáček rezistorem zapojeným do série - zapojením rezistoru do série s vinutím kotvy (i s ostatními vinutími) se pouze oddálí asymptota charakteristiky rovnoběžná s osou momentu dál pod tuto osu ($\frac{R_{ab}}{C_1 \cdot C_2} < \frac{R_{ab}+R_1}{C_1 \cdot C_2} < \frac{R_{ab}+R_2}{C_1 \cdot C_2}$). Vzdálenost charakteristiky od průsečíku asymptot se téměř nemění (–··–··–··–). Otáčky lze regulovat jen směrem dolů.



Regulace otáček buzením - změnou budícího toku Φ se mění obě části rovnice (mění se parametr C_2, neboť $C_2 = \frac{\Phi}{I}$) a proto při zvětšení toku (Φ_1) se bude charakteristika přibližovat k průsečíku asymptot a zároveň se bude přibližovat i asymptota charakteristiky rovnoběžná s osou momentu blíž k této ose. Naopak při zmenšení budícího toku (Φ_2) se bude charakteristika oddalovat od průsečíku asymptot a zároveň se bude oddalovat i asymptota charakteristiky rovnoběžná s osou momentu dál od této osy.

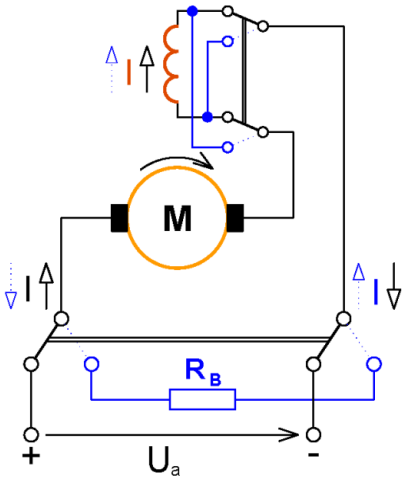


Velikost budícího toku se dá regulovat přepínáním počtu závitů budícího vinutí nebo zapojením bočníku k budícímu vinutí.



Brzdění

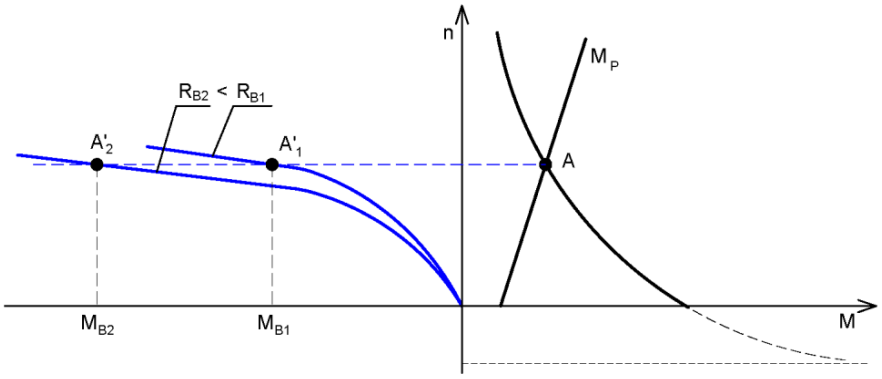
Motory se sériovým buzením mohou být brzděny buď do odporu, nebo protiproudem (reverzací).



Brzdění do odporu – Motor se odpojí od zdroje a připojí se k brzdnému rezistoru zapojenému sériově s vinutím kotvy a hlavních pólů. Tím se motor stane generátorem a změní se směr proudu. Aby se nezměnil i směr magnetického toku hlavních pólů, je nutné přehodit i přívody k budícímu vinutí. Mechanická rovnice $\omega = \frac{U}{\sqrt{C_1 \cdot C_2} \cdot \sqrt{M_h}} - \frac{R_{ab}}{C_1 \cdot C_2}$, se po odpojení zdroje napětí (U = 0) a po připojení brzdného rezistoru s odporem R_B upraví na tvar $\omega = + \frac{R_{ab}+R_B}{C_1 \cdot C_2}$, (kladné znaménko vychází z konstanty C_2, neboť při brzdění je proud rotorem opačný, tedy $C_2 = \frac{\Phi}{-I}$). Tato rovnice představuje přímku rovnoběžnou s osou momentu. Ve skutečnosti má však zpomalovací charakteristika tvar křivky, která nejdříve mírně a poté stále prudčeji klesá

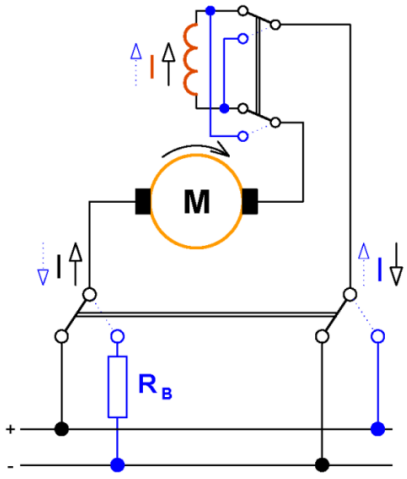
směrem k ose momentu. To je způsobeno konstantou C_2, která se při zpomalování motoru zmenšuje.

Pracovní bod A tedy přejde z pracovní charakteristiky na charakteristiku zpomalovací do bodu A‘ (zanedbáme-li pokles otáček v době přepínání) a bude brzděn brzdným momentem M_B. Brzdný moment se bude zmenšovat se zmenšujícími se otáčkami dle zpomalovací charakteristiky.



Na charakteristice jsou naznačeny dvě křivky při připojení různých rezistorů ($R_{B1} > R_{B2}$) a je patrné, že menší rezistor způsobí větší brzdný moment ($M_{B2} > M_{B1}$), ale obvodem bude také procházet větší proud (mohl by způsobit poškození vinutí). Musíme tedy volit kompromis mezi velikostí brzdného momentu a brzdného proudu.

Brzdění protiproudem – Zapojíme motor na opačný chod tím, že přepólujeme napětí zdroje

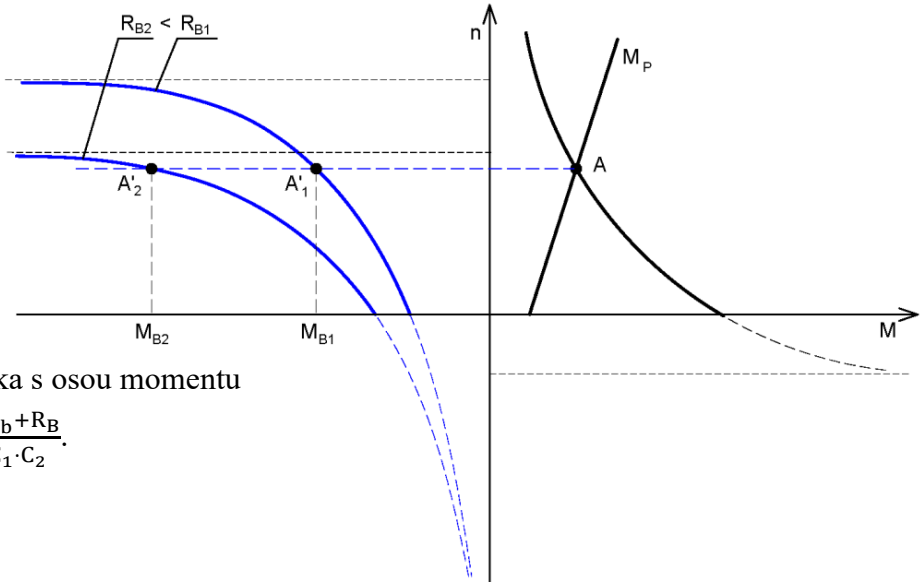


připojeného ke svorkám, přičemž velikost proudu ($I = \frac{U+U_i}{R_{ab}}$) se často zmenšuje do série zařazeným rezistorem R_B ($I = \frac{U+U_i}{R_{ab}+R_B}$) a opět musíme přepólovat i budící vinutí, aby magnetické pole hlavních pólů vytvořilo brzdný moment (snaží se roztočit motor opačně). Původní mechanická charakteristika

($\omega = \frac{U}{\sqrt{C_1 \cdot C_2} \cdot \sqrt{M_h}} - \frac{R_{ab}}{C_1 \cdot C_2}$), pak při brždění reverzací přejde na zpomalovací charakteristiku ve tvaru

$\omega = \frac{-U}{\sqrt{C_1 \cdot C_2} \cdot \sqrt{M_h}} + \frac{R_{ab}+R_B}{C_1 \cdot C_2}$

(znaménko + před druhou částí rovnice je opět dáno konstantou $C_2 = \frac{\Phi}{-I}$), což je rovnice hyperboly, jejíž jednou asymptotou je osa otáček a druhou rovnoběžka s osou momentu posunutá nad tuto osu o $\frac{R_{ab}+R_B}{C_1 \cdot C_2}$.

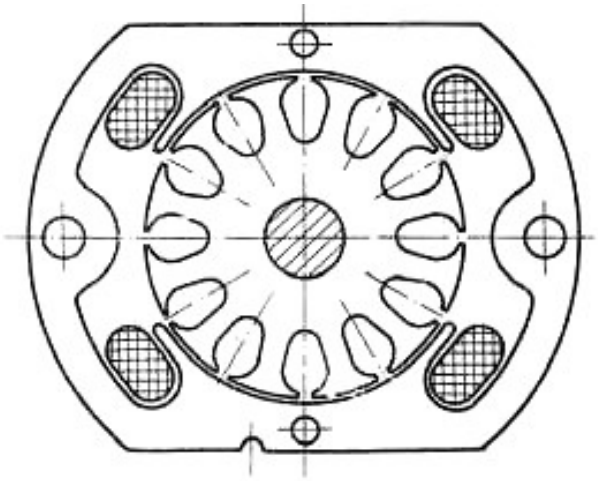


5. ZVLÁŠTNÍ TYPY MOTORŮ

5.1. Jednofázový sériový komutátorový motor

Jednofázové komutátorové motory se dnes vyrábějí už jenom jako sériové, dříve ještě existovali jednofázové komutátorové motory repulsní.

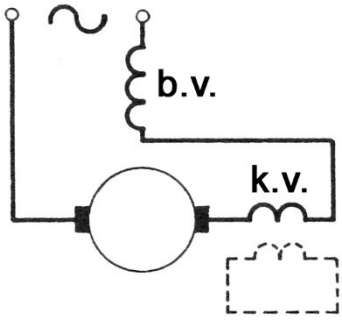
5.1.1. Konstrukční uspořádání



Stator může mít stejný tvar jako stator asynchronního jednofázového motoru tedy kostra do níž je vložen dutý válec složený se vzájemně izolovaných elektrotechnických plechů s drážkami na vnitřním obvodu, v drážkách je pak je vloženo vinutí. Dnes se však častěji jednofázové sériové motory konstruují jako univerzální tedy s možností připojení ke střídavému i stejnosměrnému zdroji napětí. Magnetický obvod statoru je pak složen z plechů, které mají tvar podobný jako plech statoru stejnosměrného motoru, mají tedy hlavní póly s pólovými nástavci, ale nemají póly pomocné (motory větších výkonů používané například v trakci pomocné póly mají - u nás se již nevyrábí). Na hlavních pólech je pak navinuto budící vinutí. Nejčastěji se vyrábějí univerzální motory dvoupólové. V některých motorech je navíc navinuto kompenzační vinutí.

Rotor univerzálního motorku je stejný, jako rotor stejnosměrného motoru tedy na hřídeli je upevněn svazek rotorových vzájemně izolovaných elektrotechnických plechů, které mají na vnějším obvodu drážky. V drážkách je izolovaně uloženo vinutí, přičemž začátky a konce každé cívky rotoru jsou vyvedeny na lamely komutátoru.

5.1.2. Princip činnosti

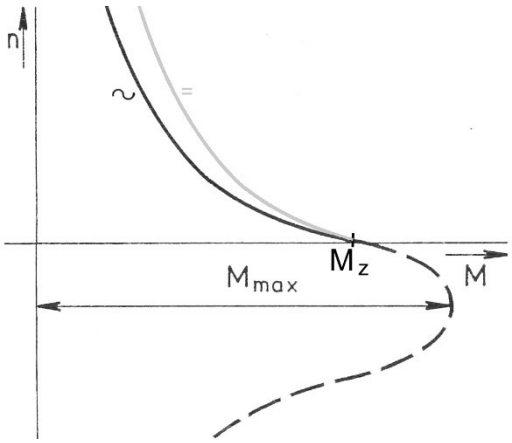


Zapojení jednofázového sériového motoru je podobné jako u stejnosměrného sériového motoru, tedy budicí vinutí (b.v.) je zapojeno v sérii s vinutím rotoru. Pro zmenšení reakce kotvy (magnetického pole buzeného proudem procházejícím rotorovým vinutím) a tím zlepšení komutace, ale hlavně pro zlepšení účiníku se používá kompenzační vinutí (k.v.), které se zapojuje také do série s rotorem, ale může být zapojeno i nakrátko (na obr. čárkovaně). Mezi kotvou a kompenzačním vinutím je magnetická vazba (i u kompenzačního vinutí nakrátko).

Točivý moment jednofázového motoru se vytváří vzájemným působením magnetického pole statoru a vodičů kotvy protékaných proudem. Na vodiče protékané proudem v magnetickém poli působí síla (moment) jejíž směr je dán pravidlem levé ruky. Při obrácení polarity

střídavého proudu ve vodiči rotoru se současně obrátí i polarita proudu budicího vinutí ve statoru, neboť jsou zapojeny do série. Obracejí se tedy i polarity magnetických toků v rotoru i ve statoru, takže smysl momentů se nezmění a motor se otáčí.

5.1.3. Vlastnosti



Motory mají malý účiník, ale zvyšuje se při vyšší provozní rychlosti, účiník se zlepšuje i použitím kompenzačního vinutí, které (kromě zmenšení reakce kotvy) zmenšuje reaktanci kotvy X. Zmenšení reaktance kotvy a tím zlepšení účiníku se dá dosáhnout také použitím napájecího napětí nižšího kmitočtu nebo zmenšením počtu závitů budící cívky (dnes běžně u menších motorů bez kompenzačního vinutí) to ale vyžaduje menší vzduchovou mezeru, aby se zachoval stejný hlavní magnetický tok stroje. Zlepšením účiníku se zvýší i přetížitelnost motoru.

Závislost otáček motoru na momentu je velice podobná jako u stejnosměrného sériového motoru. Z obrázku je patrné, že sériové motory mají velký záběrný moment M_z a měkkou rychlostní charakteristiku (s rostoucí zátěží otáčky výrazně klesají).

Jelikož se otáčky zmenšují s druhou mocninou napětí, můžeme proto podobně jako u stejnosměrného sériového motoru otáčky napětím regulovat. Napětí se může snadno měnit regulačním transformátorem nebo elektronicky pomocí pulzních měničů. Zatěžovací charakteristika při stejnosměrném napájení by ležela o něco výše (viz obr.), protože se neuplatňují reaktanční úbytky napětí.

Dosahují vyšších otáček (10 000) než jednofázové asynchronní motory a tím i větších výkonů při stejných rozměrech. Protože jejich kotva bývá většinou pevně spojena s poháněnou soustavou a často i s větrákem, nehrozí nebezpečí odlehčení a tím roztočení motoru na nekonečné otáčky.

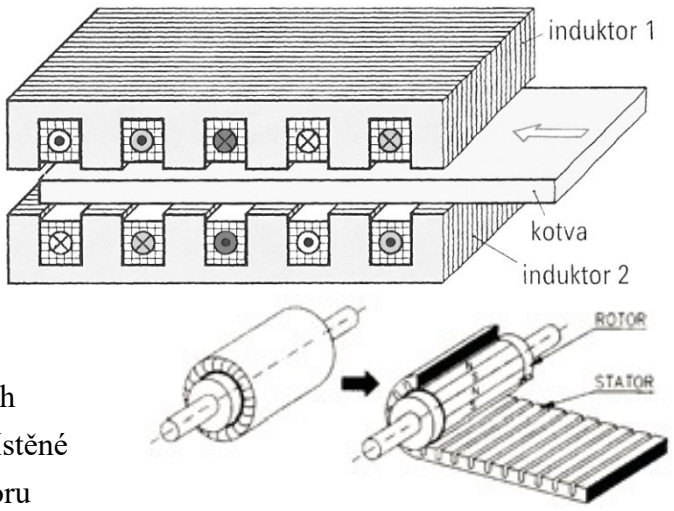
Nevýhodou těchto motorů je rušeni rádiového příjmu vlivem jiskření kartáčů na komutátoru, to se odstraňuje odrušovacími kondenzátory.

5.1.4. Použití

Jednofázových sériových motorů menších výkonů (univerzálních motorů) se používá pro drobné (domácí) spotřebiče a pro ruční nářadí, které vyžadují velký záběrný moment a vysokou rychlost otáčení. Typickými příklady jejich použití jsou vysavače, kuchyňské roboty, šicí stroje, ruční vrtačky apod. Motory větších výkonů se používali jako trakční motory pro trakci se sníženým kmitočtem 16 ⅔ Hz Švýcarsko, Rakousko nebo 25 Hz USA.

5.2. Trojfázové lineární motory

Lineární motory jsou pohony, které vyvolávají lineární pohyb. Jako příklad je zde uveden lineární trojfázový asynchronní motor.



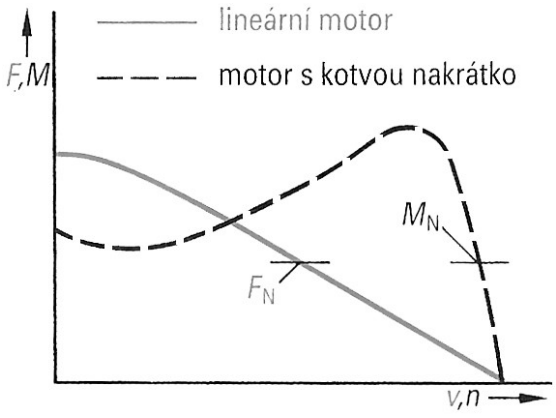
5.2.1. Konstrukční uspořádání

Budicí část vytvářející postupné magnetické pole, odpovídá statoru trojfázového motoru a nazývá se induktor. Skládá se ze svazku induktorových plechů hřebenového tvaru a trojfázového vinutí uloženého v drážkách induktoru. Používají se dva induktory umístěné proti sobě. Pohyblivá část lineárního motoru odpovídající rotoru zapojenému nakrátko se nazývá kotva, je uložena mezi oběma induktory a je tvořena masivním vodivým tělesem, například hliníkovou deskou. Použije-li se pouze jeden induktor, musí být kotva z feromagnetického materiálu, např. z oceli (může být potažena dobrým vodičem, např. hliníkem) a magnetický tok mezi póly se pak uzavírá přes kotvu mezi póly jednoho induktoru.

5.2.2. Princip činnosti

K pochopení činnosti lineárního motoru je možno si představit statorové vinutí rotačního motoru na obvodu přeříznuté a rozvinuté do roviny. Je-li toto rozvinuté vinutí napájeno trojfázovým proudem, pohybují se magnetické póly v rovině jedním směrem, např. zleva doprava. Namísto točivého pole tak vzniká posuvné (postupné) pole.

Postupné pole induktoru indukuje v kotvě silné vířivé proudy, které podle Lenzova pravidla jsou takového směru, že pole jimi indukované oslabuje postupné pole induktoru. Vířivé proudy tedy vyvolají v prostředí postupného pole induktoru sílu ve směru pohybu postupného pole, pak je-li induktor upevněn a kotva uložena pohyblivě, pohybuje se kotva ve směru postupného pole induktoru, je-li naopak pohyblivý induktor a kotva upevněná, pohybuje se induktor, ale v opačném směru než postupné pole.

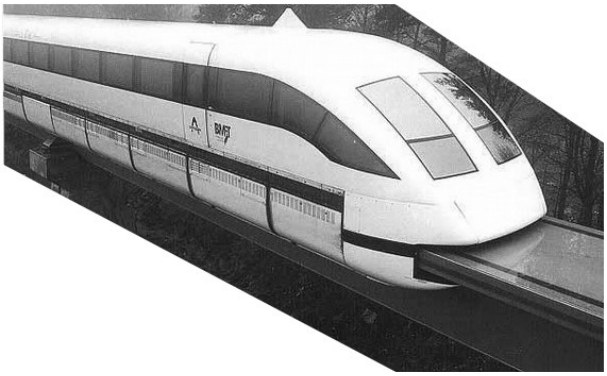


5.2.3. Vlastnosti

Lineární motory se chovají podobně jako asynchronní motory. Rychlost postupného pole závisí na kmitočtu budicího proudu, uspořádání a vzájemné vzdálenosti pólů induktoru.

Z charakteristiky vyplívá, že lineární motory vyvolávají největší sílu při rozběhu a jmenovitou sílu potřebnou pro dosažení jmenovité rychlosti mají při cca 50% skluzu. Velkého skluzu lineární motory dosahují, neboť mají velkou vzduchovou mezeru a velký odpor kotvy (pro vířivé proudy), rychlost pohybu je proto mnohem menší než rychlost postupného pole.

5.2.4. Použití

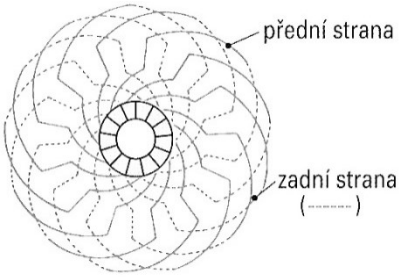


Lineární motory jsou používány jako pohon pro transport materiálu, pro pohon pásových dopravníků, ovládání vrat, ovládání pohybu velkých desek a pro pohon magnetických vlaků vznášejících se nad kolejnicí.

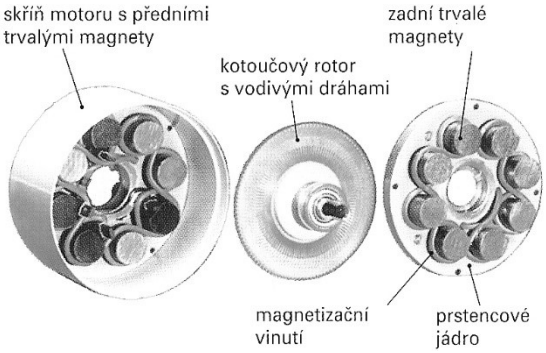
5.3. Motor s kotoučovým rotorem

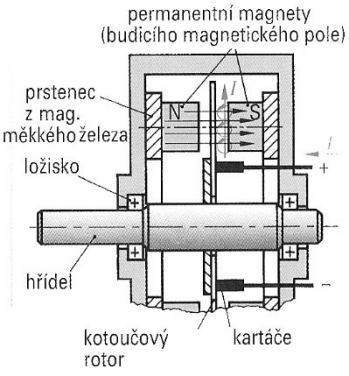
Motory s kotoučovým rotorem jsou stejnosměrné motory s rotorem bez železného jádra. Setrvačný moment je proto malý a motory se rychle rozbíhají a rychle zastavují.

5.3.1. Konstrukční uspořádání



Kotva motoru je tvořena plastovým kotoučem s vinutím po obou stranách. Vinutí je tvořeno vodivými drahami vyřezanými v měděné fólii nalepené na kotouč rotoru. Spojením konců oboustranných vodivých drah, např. letováním, vznikne průchozí vinutí. Přívod proudu do kotvy je realizován přes kartáče, a to většinou přímo na vodivé dráhy rotoru, které tvoří komutátor. Budicí pole zajišťují permanentní magnety upevněné na prstenci statoru z magneticky měkkého železa. Trvalé magnety jsou při montáži motoru zmagnetizovány trvale vestavěným magnetizačním vinutím. Jejich magnetická pole se uzavírají přes prstencová jádra





5.3.2. Princip činnosti

Vodivé dráhy kotoučového rotoru napájené přes kartáče stejnosměrným proudem vytvářejí magnetické pole, které se překrývá s budicím polem. Podle pravidla levé ruky působí na vodivé dráhy protékané proudem síla vytvářející točivý moment.

Přepólováním napájení kotvy lze změnit směr otáčení motoru.

5.3.3. Vlastnosti

Díky malé hmotnosti rotoru mohou být u motoru s kotoučovým rotorem dosaženy jmenovité otáčky během několika milisekund. Rovněž zastavení nebo změna směru otáčení probíhají velmi rychle. Odkryté neizolované vodivé dráhy umožňují dobré chlazení, tj. velkou proudovou hustotu a také velké krátkodobé proudové přetížení. Homogenní budicí pole zaručuje i při malých otáčkách rovnoměrný běh při konstantním točivém momentu a dovoluje přesné nastavení polohy kotvy.

5.3.4. Použití

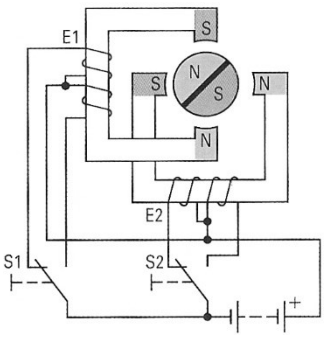
Motory s kotoučovým rotorem jsou vyráběny s výkony od 20W až do 10 kW. Používají se pro svou přesnost a rychlost např. pro pohon navíječek, ventilů a posuvů obráběcích strojů, jsou často používány i namísto krokových motorů a jako servomotory v regulační technice.

5.4. Krokový motor s krokem 90°

5.4.1. Konstrukční uspořádání

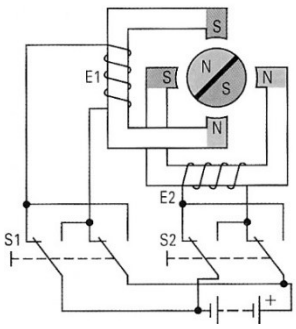
Skládají se z rotoru z permanentního magnetu, který se otáčí ve statoru, složeném ze dvou magnetických obvodů na kterých je navinuto stejnosměrné vinutí. Tato vinutí jsou dvojího druhu, buď jsou složena ze dvou částí (vinutí s odbočkou) nebo jsou jednoduché. Cívky statoru jsou připojeny přes stykače, které řídí přivádění impulzů ze zdroje stejnosměrného proudu k jednotlivým cívkám. Krokové motory se vyrábějí jako jednofázové nebo vícefázové

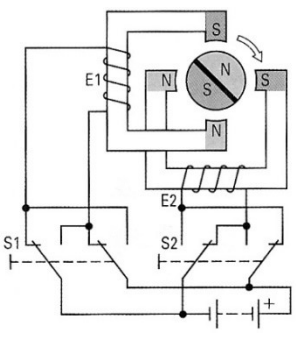
5.4.2. Princip činnosti



Změnou polarity pólů magnetických obvodů se mění natočení rotoru z permanentního magnetu. Polarita statorových pólů může být měněna dvěma způsoby podle druhu vinutí.

Je-li každé vinutí složeno ze dvou cívek, mluvíme o tzv. unipolárním provozu. Každá polovina cívky je zdrojem magnetického toku v jednom směru. Přepínáním proudu do jedné a druhé poloviny cívek se mění polarity pólových párů statoru a tím i natočení rotoru.





Je-li budicí vinutí každého magnetu tvořeno jen jednou cívkou a přepólování je realizováno změnou směru proudu v cívce, mluvíme o tzv. bipolárním provozu. Na obrázku je patrné přepínání pólů na magnetických obvodech a tím natáčení rotoru (spínač S2 je v jedné a pak ve druhé

poloze).

Dochází-li k přepólování postupně v jednom směru, vznikne točivé pole, které se může měnit po krocích, nebo určitou rychlostí otáček. Kotva krokového motoru tedy může být řízena v krokovém nebo rovnoměrném otáčivém pohybu.

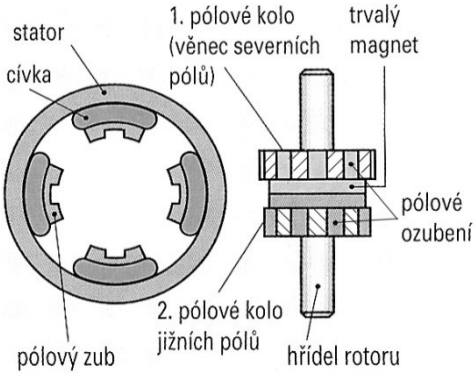
Smysl otáčení (směr postupných kroků) lze obrátit změnou pořadí proudových impulzů.

Protože k obsluze mechanických přepínačů je potřebná velká energie, přepínání je relativně pomalé a přepínače se opotřebovávají, používá se dnes častěji elektronické přepínání, které potřebné stejnosměrné impulzy spíná elektronicky.

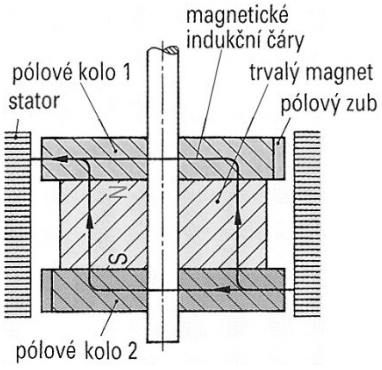
Krokové motory mění elektrické řídicí impulzy na odpovídající posloupnosti kroků bez přenosové chyby, takže zpětné kontrolní hlášení polohy není nutné.

5.5. Krokový motor s malým krokovým úhlem

5.5.1. Konstrukční uspořádání



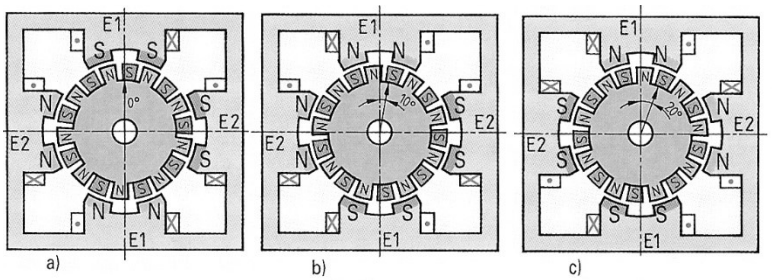
Požadovaný velký počet pólů krokového motoru vyžaduje speciální konstrukci. Motor je konstruován na jednopólovém principu. Na hřídeli motoru je permanentní magnet s axiálně uspořádanými póly, na jejichž čelních stranách (přední a zadní) jsou pólové nástavce, tvořící jakési zuby. Zuby každého ozubeného pólového kola jsou téže polarity, jsou ale vzájemně mechanicky pootočeny o půl zubové rozteče, čímž je dosaženo střídání polarity na obvodu rotoru. Mezi severními póly předního pólového ozubeného kola jsou tedy nastaveny jižní póly zadního pólového zubového kola.



Stator složený z plechů má dvě vinutí (fáze). Každá fáze se skládá ze dvou sériově zapojených cívek, které vytvářejí protikladné statorové póly. Vnitřní dělení statoru je také ve tvaru zubů a je shodné s ozubeným dělením rotoru.

5.5.2. Princip činnosti

K vysvětlení principu je na obrázku znázorněn motor s devíti zubovým rotorem a dvou zubovým statorem. Rotor zaujme vždy polohu, ve které jeho zuby stojí oproti protikladným zubům statoru, a ve které je magnetický odpor pro magnetický tok nejmenší.



Při přepólování směru proudu ve vinutí El se změní polarita statorových nástavců (zubů).

Rotor na to reaguje pootočením o krokový úhel, např. o úhel 10° při uspořádání dle obr. *b*. Při dalším přepólování tentokrát cívky E2 dojde k dalšímu pootočení (viz obr. *c*). Každé další přepólování v pořadí E1, E2, E1 atd. způsobí vždy pootočení o 10° ve směru hodinových ručiček.

Je-li krokový motor napájen konstantním napětím, narůstá se zvětšujícím se kmitočtem jalová induktivní reaktance statoru. Tím klesá odebíraný proud a tím i točivý moment motoru. Pokud by měl při nárůstu kmitočtu točivý moment zůstat zachován, musel by být motor napájen řízeným zdrojem konstantního proudu.

5.5.3. Vlastnosti a použití

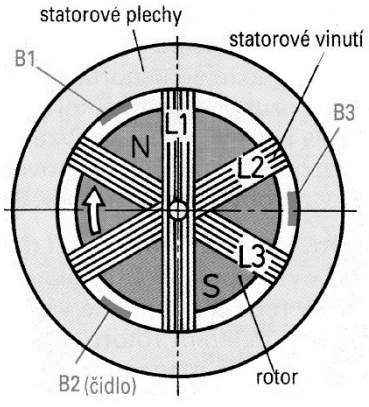
Při normálním zatěžovacím momentu se krokový motor vždy pootočí o krokový úhel, který odpovídá řídicímu impulzu. Může však dojít k tomu, že zatěžovací úhel (úhel skluzu rotoru) naroste do velikosti jednoho krokového úhlu. Protože se však tato chyba nepřipočítává znovu s každým krokem, nemůže být na konci série impulzů chyba větší, než je krokový úhel a jelikož krokový úhel těchto typů motorů je velice malý (v našem případě 10°) říkáme, že krokový motor pracuje s velkou přesností.

Při odpojení proudu do vinutí statoru vznikne díky působení magnetů rotoru a remanentního toku statoru pevné nastavení rotoru.

Pro jednoduchou konstrukci a velkou spolehlivost jsou tyto krokové motory používány pro řízené pohony, dálkové řízení, dálnopisy, pohony tiskáren, počítadel a v jiných oblastech řídicí a regulační techniky.

5.6. Elektronický motor

5.6.1. Konstrukční uspořádání

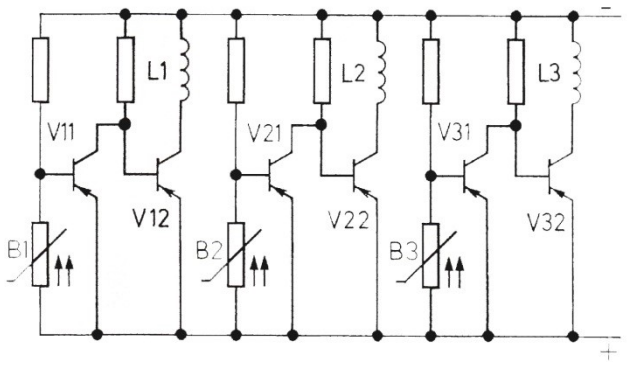


Statorové vinutí elektronického motoru se skládá nejméně ze tří vinutí (cívky L1 až L3) rovnoměrně rozmístěných po obvodu statoru, která jsou postupně buzena stejnosměrným proudem. V prostoru mezi cívkami jsou na vnitřním obvodu statoru umístěná magnetická čidla (magnetorezistory B1 až B3). Odpor magnetorezistoru narůstá úměrně indukci okolního magnetického pole. Kotva elektronického motoru je tvořena permanentním magnetem ve tvaru válce.

Existují také elektronické motory s vnějším rotorem. Statorové cívky jsou pak rozloženy kolem vnitřního statorového jádra tvořeného svazkem statorových plechů a vnější rotor je tvořen ocelovým prstencem opatřeným permanentními magnety, obklopujícím věnec budicích vinutí.

5.6.2. Princip činnosti

Poloha rotoru působí na magnetická čidla a ty zapínají a vypínají tranzistorové obvody, které přivádějí proud do jednotlivých statorových vinutí L1, L2, L3. Postupným přepínáním se póly přemísťují po obvodu a vzniká tak točivé magnetické pole a rotor z permanentního magnetu se bude otáčet stejnými otáčkami jako toto pole. Buzení statorových cívek (přivádění proudu do cívek) elektronického motoru je tedy přímo řízeno magnetickým polem otáčejícího se rotoru.



Na obrázku schéma zapojení je patrný princip činnosti buzení cívek statoru. Například je-li kotva v poloze, při které je indukce velká u čidla B1, má tento magnetorezistor velký odpor a báze tranzistoru V11 je záporná a V1l bude otevřený. Báze tranzistoru V12 proto bude kladná a V12 bude uzavřený cívka L1 tedy nebude buzena (nebude jí procházet proud). Naproti tomu cívkami L2, L3 proud poteče (magnetorezistory B2 aB3 mají malý odpor a tranzistory V22 a V32 jsou otevřeny) a kotva se natočí do odpovídající polohy. Tím se změní hodnoty odporů magnetorezistorů (B2 bude velký, B1 a B3 malý) a dojde k uzavření tranzistoru V22 a otevření V12 (V23 zůstal otevřen) a rotor se opět pootočí. Celý proces se opakuje i se třetím vinutím a pak zase dokola.

5.6.3. Použití

Elektronické motory jsou používány např. k pohonu bateriových magnetofonů a CD-přehrávačů.

POUŽITÁ LITERATURA

[1] VOŽENÍLEK, Ladislav a František LSTIBŮREK. *Základy elektrotechniky II*: *pro 2. a 3. ročník elektrotechnických a studijních oborů středních odborných učilišť*. Praha: SNTL, 1985. 04-522-85.

[2] TKOTZ, Klaus a kolektiv. *Příručka pro elektrotechnika*. Praha: Europa-Sobotáles, 2002. ISBN 80-867-0600-1.

[3] VLADAŘ, J. a J. ZELENKA. *Elektrotechnika a silnoproudá elektronika*. Praha: SNTL, 1986.

[4] ŘÍHA, Josef. *Elektrické stroje a přístroje*. Praha: SNTL, 1986. 04-527-86.