

Indukční stroje

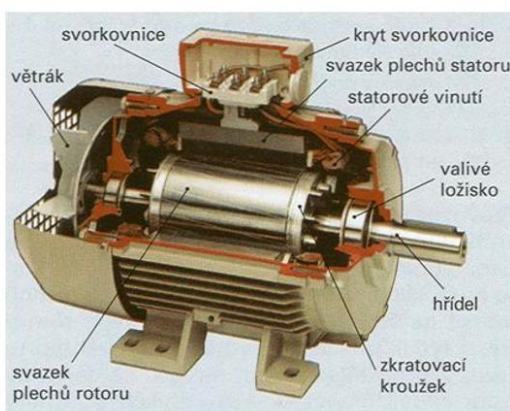
Modul indukční stroje se zabývá poznatky vzniku točivého magnetického toku a jeho využitím v různých typech motorů. Dále modul indukční stroje zahrnuje rozdělení na motory asynchronní, synchronní, komutátorové a speciální. Jsou zde uvedeny principy, poznatky z jednotlivých provozních stavů, zapojení satorových i rotorových vinutí, regulace otáček, brzdění, rozběh, momentové charakteristiky a energetická bilance zařízení.

Rozdělení indukčních strojů

Tato lekce se zabývá rozdělením elektrických indukčních strojů točivých.

Elektrické točivé stroje jsou zařízení, která jsou schopna přeměňovat elektrickou energii v mechanickou (elektromotory), nebo ji naopak z mechanické energie vyrábět (generátory).

Každý elektrický točivý stroj má dvě části - stator a rotor. Stator je pevná část, rotor je točivá část elektrického stroje. Obě části se skládají z magnetického obvodu a elektrického vinutí.



Obr. 1: Asynchronní motor s kotvou nakrátko

Indukční stroje se dělí na:

- točivé
- netočivé

Točivé

•Motory

- stejnosměrné
 - s cizím buzením
 - derivační
 - sériové
 - kompaundní
- střídavé
 - asynchronní
 - synchronní
 - komutátorové

Asynchronní stroje jsou konstrukčně nejjednodušší, nejlevnější, nejpoužívanější a téměř bezúdržbové s vysokou provozní spolehlivostí. Dosahují výkonů řádově od desítek wattů do výkonů jednotek MW např. ve vodních elektrárnách. U indukčních strojů se přenáší elektrická energie ze statoru do rotoru pomocí elektromagnetické indukce. Co do počtu jsou nejčastěji používaným druhem motoru v průmyslu.

U komutátorových strojů je elektrická energie většinou do statoru i rotoru přivedena vedením. V současnosti se název asynchronní komutátorový stroj nepoužívá. Mluvíme-li tedy o asynchronním stroji, máme na mysli motor nebo generátor.

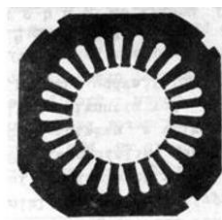
Synchronní stroje jsou točivé stroje, jejichž otáčky jsou úměrné pouze frekvenci napájecího napětí a počtu pólových párů (dvojic). V případě synchronního motoru se rotor takového stroje otáčí se stejným počtem otáček jako magnetické pole statoru. Synchronní motory mají stejnou konstrukci jako alternátory a alternátory lze použít jako synchronní motory a naopak. Připojíme-li synchronní motor k síti, odebírá z ní trojfázový proud, který ve statoru vytváří točivé magnetické pole. Rotor motoru budíme stejnosměrným proudem (jako v alternátoru), který vedeme do jednotlivých pólů. Jsou svými vynikajícími momentovými charakteristikami vhodné pro využití v lodním průmyslu. Stroje jsou projektovány především pro pomocné pohony. Provedení motorů vyhovuje klasifikačním předpisům pro lodě, horské lanovky.

•Generátory

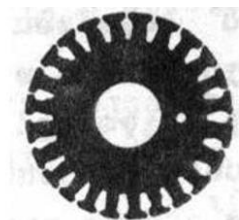
- střídavé (alternátory)
 - asynchronní
 - synchronní
- stejnosměrné
 - s cizím buzením
 - derivační
 - seriové
 - kompaundní



Obr. 2: Stator



Obr. 3: Statorový plech



Obr. 4: Rotorový plech

Stejnoseměrné točivé stroje dělíme podle přeměňování energie na elektromotory a generátory, které však v případě, kdy vyrábějí stejnosměrný proud, nazýváme dynamo.

Směr otáčení stroje se udává při pohledu ze strany vyvedeného hřídele. Směr otáčení ve smyslu hodinových ručiček ze strany hřídele je považován za směr doprava, opačný směr za směr doleva.



Obr. 5: Kotva nakrátko s ložisky a větrákem

Trojfázový indukční motor

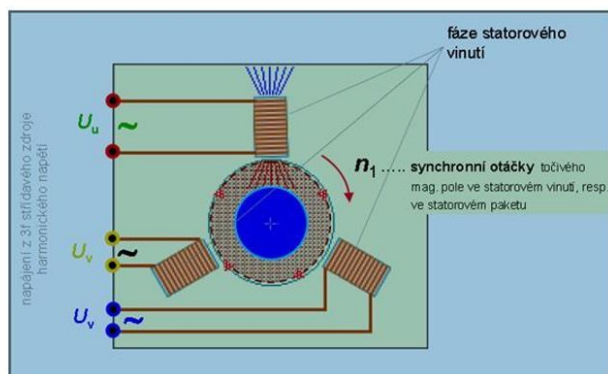
Tento výukový modul se zabývá indukčním asynchronním motorem s kotvou nakrátko. Zahrnuje principy, poznatky z jednotlivých provozních stavů, zapojení statorového vinutí, regulace otáček, brzdění, rozběh, momentové charakteristiky a energetickou bilanci zařízení.

Tato lekce se zabývá principem činnosti a konstrukcí indukčního trojfázového motoru.

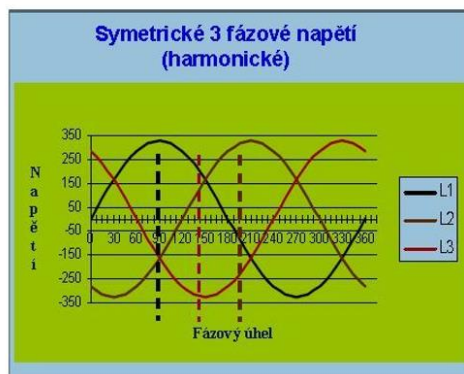
Asynchronní motor je výrobně nejjednodušší, a proto nejlevnější elektrický motor s vysokou spolehlivostí. Je nejčastěji používaným motorem (v 90 %), nevýhodou je pouze velký proudový náraz při rozběhu a induktivní účinník, způsobující jalové zatížení sítě.

Princip činnosti

Napájíme-li trojfázové vinutí asynchronního motoru ze střídavé trojfázové sítě, vytvoří se v něm točivé magnetické pole. Točivé magnetické pole indukuje v rotorových vodičích napětí. Protože je rotorové vinutí uzavřeno, začne jím protékat rotorový proud, který vytvoří kolem vodičů magnetické pole rotoru. Vzájemným působením statorového a rotorového pole vznikne výsledné pole, které působí na rotorové vodiče silami. Působením těchto sil se začne rotor otáčet, vznikne točivý moment asynchronního motoru.



Obr. 1: Princip



Obr. 2: Časový průběh napětí na statorovém vinutí

Rozdíl mezi rychlostí otáčení točivého magnetického pole a rychlostí otáčení rotoru nazýváme **skluzovou rychlostí otáčení** - skluz, který je vyjádřen v procentech.

Výpočet skluzu: $s = \frac{n_s - n}{n_s} * 100 (\%)$

kde s je skluz, n_s jsou synchronní otáčky a n jsou otáčky rotoru.

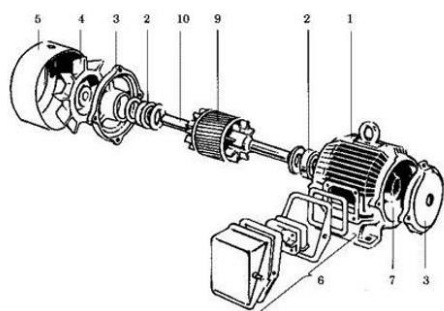
Skluz bývá 1 až 10 %, přičemž obecně platí, že čím větší je stroj, tím nižší má skluz.

Rychlost otáčení tohoto magnetického pole závisí na frekvenci napájecí sítě a na počtu pólových dvojic stroje: $n_s = \frac{f}{p}$,

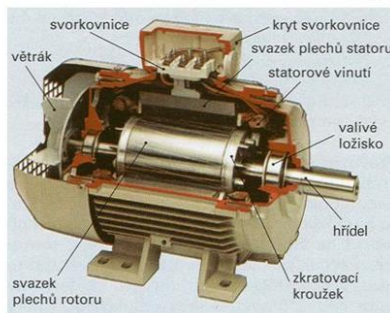
kde f je frekvence, p je počet pólových dvojic a n_s jsou synchronní otáčky.

Konstrukce

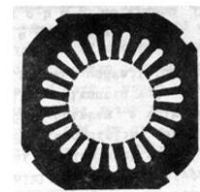
Hlavní části trojfázového asynchronního motoru tvoří **stator (1)** a **rotor (9)**.



Obr. 3: Rozložený motor



Obr. 4: Motor



Obr. 5: Statorový plech

Ve **statorové kostře** je zalisován statorový svazek. Statorová kostra je většinou z hliníku, litiny nebo je svařovaná. Zejména menší stroje mohou mít kostru z nemagnetického materiálu či z plastů. Statorový svazek je složen z elektrotechnických izolovaných plechů tloušťky 0,3 až 0,5 mm. Plechy mají na svém vnitřním průměru drážkování, ve kterém je izolovaně uloženo trojfázové statorové vinutí z měděných nebo hliníkových vodičů.

Rotorový svazek, který je složen taktéž z elektrotechnických plechů, je u menších strojů nalisován přímo na hřídel motoru, u větších strojů se lisují nalité nebo svařované hvězdice, jež jsou naklínované na hřídeli. Motory s kotvou nakrátko mají rotorové drážky vyplněny hliníkovými nebo měděnými tyčemi, které jsou na obou stranách spojeny kruhy nakrátko a dohromady vytváří klec. Výrobně nejlevnější jsou hliníkové klece. Celá klec včetně lopatek ventilátoru vznikne najednou odlitím roztaveného hliníku nebo mědi do formy s vloženým rotorovým svazkem.



Obr. 6: Rotorový plech

Směr otáčení stroje se udává při pohledu ze strany vyvedeného hřídele. Směr otáčení ve smyslu hodinových ručiček ze strany hřídele je považován za směr doprava, opačný směr za směr doleva.

Trojfázový indukční motor - chod naprázdno

Tato lekce se zabývá chodem indukčního motoru naprázdno.

Princip činnosti chodu naprázdno ($s \rightarrow 0$)

Stavem naprázdno rozumíme případ, kdy se motor točí bez zátěže na hřídeli $P = 0$.

- Otáčky motoru jsou téměř synchronní, rotor je brzděn pouze ventilačními ztrátami a třením v ložiskách.
- Rotorovým vinutím protéká zanedbatelný proud, Jouleovy ztráty v rotorovém vinutí jsou prakticky nulové: $I_2 \rightarrow 0$.
- Stroj odebírá ze sítě činný výkon na pokrytí mechanických ztrát a ztrát v železe statoru (rotor se otáčí téměř stejně rychle jako točivé pole, ztráty v železe rotoru jsou zanedbatelné) a hlavně jalový výkon na vytvoření magnetického pole.
- Jalová složka proudu značně převyšuje činnou složku, účinník je proto velmi malý, dosahuje hodnoty přibližně $\cos \varphi = 0,1$.
- Při chodu naprázdno se skluz blíží k nule: $n_s \rightarrow n$.

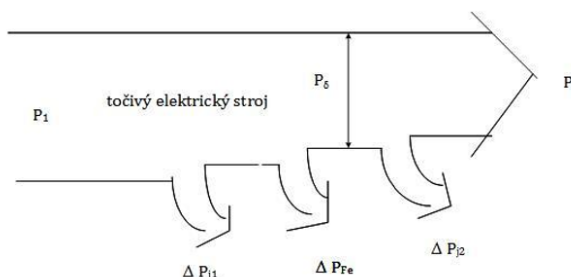
Náhradní schéma



Obr. 1: Náhradní schéma asynch. motoru naprázdno

Diagram ztrát

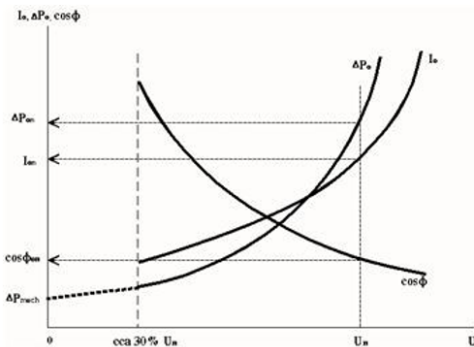
V **diagramu ztrát** značí P_1 příkon motoru, P výkon motoru, ΔP_{j1} (Jouleovy) ztráty ve statoru (ve vinutí statoru), ΔP_{Fe} ztráty v železe, ΔP_{j2} (Jouleovy) ztráty v rotoru (ve vinutí rotoru), P_δ výkon přes vzduchovou mezeru.



Obr. 2: Diagram ztrát

Charakteristika motoru naprázdno

Charakteristika motoru naprázdno $I_0 = f(U)$ je opět zakřivená vlivem sycení, ztráty naprázdno, prakticky jen ztráty v železe, jsou úměrné U_2 , účinník strmě klesá. Pro U_n odčítáme jmenovité hodnoty naprázdno.



Obr. 3: Charakteristiky motoru naprázdno

Závěr

Z výše uvedeného je patrné, že v praxi je nežádoucí chod indukčního motoru naprázdno, protože velmi zhoršuje účinník sítě $\cos \varphi$ (tím, že odebírá ze sítě jen jalovou energii).

Protože se magnetický tok indukčního stroje uzavírá přes vzduchovou mezeru **dvakrát**, je potřebný magnetický proud značně větší než u transformátorů.

Trojfázový indukční motor - chod nakrátko

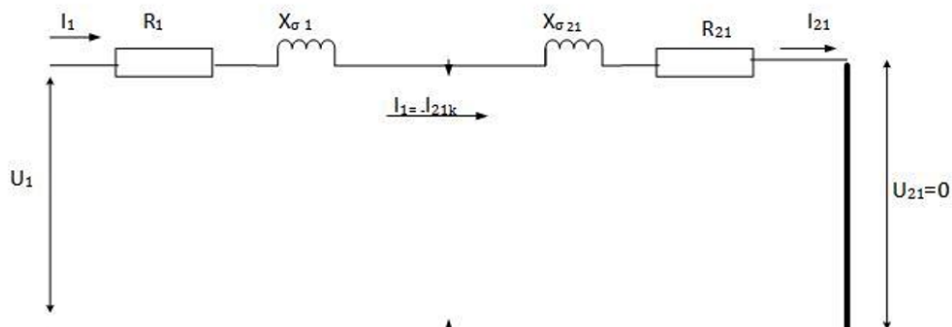
Tato lekce se zabývá chodem indukčního motoru nakrátko.

Princip činnosti chodu nakrátko ($s = 1$)

Stavem nakrátko rozumíme případ, kdy se rotor netočí, tzn. na začátku každého rozběhu, při připojení na síť a při zastavení způsobeném přetížením (obecně při zabrzděném rotoru).

- Rotor je spojen dokrátko: $U_{21} = 0$.
- Při otáčkách motoru $n = 0$ je skluz $s = 1$.
- Při chodu nakrátko je skluz roven jedna, $n_s = 1$, magnetické pole se otáčí vzhledem ke statoru a rotoru stejně.

Náhradní schéma



Obr. 1: Náhradní schéma

P_1 značí příkon motoru, P výkon motoru, ΔP_{j1} (Jouleovy) ztráty ve statoru (ve vinutí statoru), ΔP_{Fe} ztráty v železe jsou zanetbatelné a ΔP_{j2} (Jouleovy) ztráty v rotoru (ve vinutí rotoru).

Výpočet

$$U_{1n} = R_1 I_{1k} + jX_{1\sigma} I_{1k} + jX_{21\sigma} I_{1k} + R_{21} I_{1k}$$

$$I_{21k} = I_{1k}$$

$$U_{1n} = (R_1 + R_{21}) I_{1k} + (jX_{1\sigma} + jX_{21\sigma}) I_{1k}$$

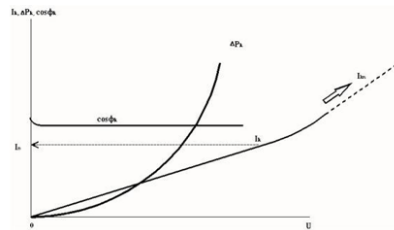
$$U_{1n} = R_k I_{1k} + jX_k I_{1k} = I_{1k} (R_k + jX_{1k}) = I_{1k} Z_k$$

$$U_{1n} = I_{1k} Z_k$$

$$I_{1k} = (4 - 8) I_n$$

Charakteristika motoru nakrátko

Charakteristika motoru nakrátko $I = f(U)$ je opět lineární, pouze při vysokém proudu se začínají sytit zuby rozptylovým tokem a charakteristika se ohne k vyšším proudům. Ztráty ve vinutí rostou úměrně I^2 i U^2 . Účinník je téměř konstantní.



Obr. 2: Charakteristiky motoru nakrátko

Závěr

Z výše uvedeného je patrné, že vodivost hlavního magnetického toku je menší než u transformátoru, neboť transformátor nemá v hlavním magnetickém obvodu vzduchové mezery.

Napětí indukované při chodu nakrátko v rotorovém vinutí U_{21} je velmi malé, neboť při nulovém zatěžovacím odporu prochází proud jen nepatrným odporem rotorového vinutí.

Na jeho indukci stačí jen malý magnetický tok Φ_2 , takže při chodu nakrátko se téměř celý statorový magnetický tok Φ_1 rozdělí na rozptylové toky: $\Phi_1 = \Phi_{1\sigma} + \Phi_{2\sigma}$.

Proud nakrátko I_{1k} je mnohonásobně větší jak I_n , proto příčnou větev náhradního schématu zanedbáváme. Tento zkratový proud I_{1k} je velký a závisí i na frekvenci sítě.

Trojfázový indukční motor - chod při zatížení

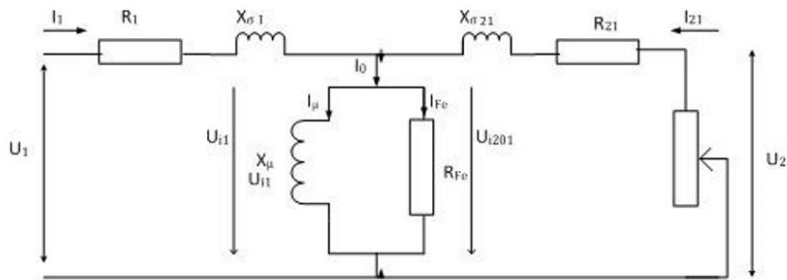
Tato lekce se zabývá chodem indukčního motoru při zatížení.

Princip činnosti chodu motoru při zatížení

Připojíme-li statorové vinutí k trojfázové síti a hřídel motoru je mechanicky zatížen pracovním strojem, jemuž odevzdává mechanický výkon formou hnacího momentu, jde o chod při zatížení.

- Rotor se začne zpožďovat za točivým magnetickým polem, aby se v jeho vinutí mohlo indukovat napětí, potřebné k protlačení rotorového proudu I_2 vinutí rotoru.
- Čím větším momentem rotor zatěžíme, tím více se zpožďuje za točivým magnetickým polem.
- Otáčky rotoru klesají a skluz se zvětšuje.

Náhradní schéma



Obr. 1: Náhradní schéma indukčního motoru při zatížení

Výpočet

Rotorový proud I_2 a napětí U_{i2} indukované v rotoru mají frekvenci, která je dána rozdílem otáček točivého magnetického pole a otáček rotoru. Napětí indukované v rotoru je dáno vztahem $U_{i2} = \pi\sqrt{2}\Phi f_2 N_{s2} k_{p2}$.

Při normálním provozu motoru je frekvence rotorového proudu velmi malá: při skluzu 6% činí $0,06 \cdot 50 = 3 \text{ Hz}$.

Indukované napětí se bude měnit podle zátěže tak, že čím větší napětí, tím větší skluz. Pro $n = 0$ a $s = 1$ je $U_{i2} = U_{i20}$ (je nejvyšší a působí jako transformátor). Pro $s = 0$ a $n_s = n$ je $U_{i2} = 0$.

U indukčního motoru je třeba respektovat rozptyl magnetického toku. Část magnetického toku Φ_1 se uzavírá kolem statorového vinutí a část magnetického toku Φ_2 kolem rotorového vinutí. Rozptylové toky se zvětšují s rostoucím zatížením, neboť jsou vybudeny proudy I_1 a I_2 , které se zatížením také mění. Je tedy skutečný magnetický tok Φ ve vzduchové mezeře při každém zatížení jiný a při každém zatížení se indukuje ve vinutí jiné napětí. Proto se snažíme, aby vzduchová mezera byla co nejmenší a tím i ztráty magnetického toku.

Rozptylová reaktance statorového vinutí je stálá a je dána stálostí síťové frekvence f_1 :

$$X_{1\sigma} = 2\pi f_1 L_1.$$

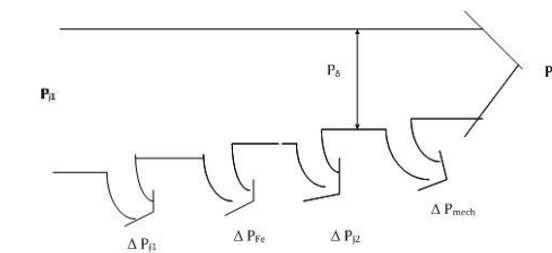
Rozptylová reaktance rotorového vinutí je proměnlivá, neboť závisí na proměnlivém kmitočtu f_2 :

$$X_{2\sigma s} = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi s f_1 L_2 = s X_{2\sigma},$$

$$\text{kde } X_{2\sigma} = 2\pi f_1 L_2.$$

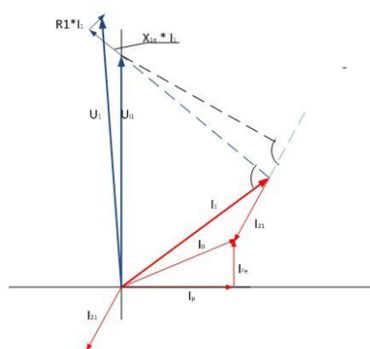
Diagram ztrát

V **diagramu ztrát** značí P_1 příkon motoru, P výkon motoru, ΔP_{j1} (Jouleovy) ztráty ve statoru (ve vinutí statoru), ΔP_{Fe} ztráty v železe, ΔP_{j2} (Jouleovy) ztráty v rotoru (ve vinutí rotoru), P_δ výkon přes vzduchovou mezera a P_{mech} mechanickou ztrátu.



Obr. 2: Diagram ztrát motoru

Fázorový diagram



Obr. 3: Fázorový diagram při zatížení

Trojfázový indukční motor – momentová charakteristika indukčního motoru

Tato lekce se zabývá průběhem momentové charakteristiky.

Momentová charakteristika asynchronního motoru

Momentová charakteristika $M = f(n)$ vyjadřuje závislost momentu motoru na jeho otáčkách n , respektive na skluzu s .

Normální průběh momentové charakteristiky se kreslí v rozsahu $s = (0-1)$, což odpovídá rozsahu otáček $n = (n_s - 0)$. Momentové přetížení musí motor vydržet po dobu 15 s a nesmí se přitom zastavovat. Maximálnímu momentu přísluší skluz zvratu (ozn. s_{zv}). Proud rotoru I_2 vytvoří s točivým magnetickým polem Φ_1 moment, pro jehož velikost platí:

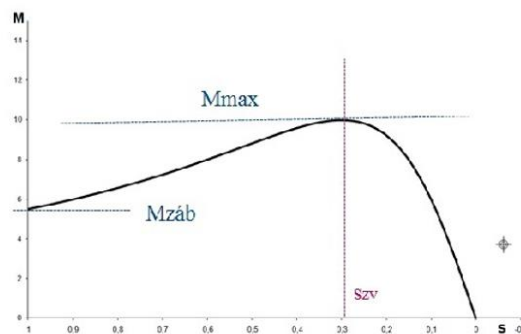
$$M = k \cdot \Phi_1 \cdot I_2.$$

Se vzrůstajícím zatížením indukčního motoru se zvětšuje skluz, tj. zvětšuje se proud rotoru I_2 , a pokud bychom zanedbali rozptylový tok, platilo by $\Phi_1 = \Phi_{id}$ (ideální) a průběh ideálního momentu by byl dán rovnicí přímky:

$$M = k \cdot \Phi_1 \cdot I_2 \text{ (moment skutečný),}$$

$$M_{id} = k \cdot \Phi_{id} \cdot I_2 = K \cdot I_2.$$

Ve skutečnosti se však se zvětšujícím zatížením respektive skluzem zvětšuje rozptylový tok okolo vodičů, tzn. skutečný tok Φ_1 se zmenšuje ($\Phi_1 < \Phi_{id}$) a rotorový proud není přímo úměrný zatížení, takže momentová charakteristika $M = f(n)$ i proudová charakteristika $I = f(n)$.



Mmax	maximální moment	Szv	skluz zvratu
Mzáb	záběrný moment		

Obr. 1: Momentová charakteristika, kde s_n je jmenovitý skluz, s_{zv} skluz zvratu, M_n jmenovitý moment, M_{max} maximální moment a M_z záběrný moment

Výpočet

Mechanickému momentu na hřídeli odpovídá točivý moment $M = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{\frac{2\pi \cdot n}{60}} = 9,55 \cdot \frac{P}{n}$ (Nm; W, min⁻¹),

kde n jsou otáčky zmenšené o skluz vzhledem k synchronním otáčkám $n = n_s \cdot (1 - s)$.

Je vidět, že moment je úměrný výkonu točivého magnetického pole ve vzduchové mezeře při synchronních otáčkách dle: $M = 9,55 \cdot \frac{P_g}{n_s}$ (Nm; W, min⁻¹).

Závěr

Moment je závislý na obvodové tažné síle, která podle vztahu $F = B \cdot l \cdot I$ závisí na rotorovém proudu I_2 a magnetické indukci B , která je přímo úměrná magnetickému toku Φ . Platí tedy:

$$M \sim \Phi \cdot I_2.$$

Moment a výkon jsou úměrné druhé mocnině napětí:

$$M \sim P \sim U^2.$$

Ve skutečnosti se magnetický tok i proud rotoru s rostoucím zatížením (skluzem) zmenšují (viz obr. 1). Momentu M_{max} dosahuje při takovém skluzu, při kterém je součin $\Phi \cdot I_2$ největší. Zvětší-li se vnější zatěžovací moment nad maximální moment M_{max} , zvětší se skluz nad hodnotu S_{zv} , moment klesne pod M_{max} a motor se zastaví.

Pro praxi je důležitý poměr záběrného momentu M_z k momentu jmenovitému M_n , který průměrně bývá $M_z = (1-2) \cdot M_n$, pro motory pro přímé spouštění. Pro rozběh motoru není tedy důležitý samotný záběrný moment, ale jeho průběh během rozběhu. Tyto průběhy se dají upravovat konstrukcí rotorové klece.

Motor pro daný rozběh musí být navržen tak, aby zatížení za provozu nepřestoupilo maximální moment a aby moment motoru ani během rozběhu neklesl pod zatěžovací moment.

Na průběh momentové charakteristiky a záběrný moment má největší vliv činný odpor rotoru.

Ztráty a účinnost indukčních trojfázových motorů

Tato lekce se zabývá ztrátami a účinnostmi trojfázových indukčních motorů s kotvou nakrátko.

Ztráty na indukčních motorech

Jsou dané následujícím vztahem a náhradním schématem:

$$\Delta P = \Delta P_{j1} + \Delta P_{Fe1} + \Delta P_{př},$$

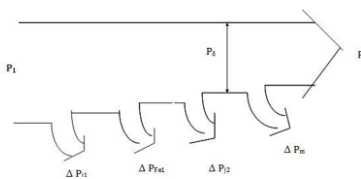
kde $\Delta P_{př}$ jsou ztráty přídatné, které v sobě zahrnují ztráty vířivými proudy a pulsací magnetického toku,

ΔP_{Fe1} jsou ztráty v železe statoru a ΔP_{j1} jsou ztráty ve vinutí statoru.

U chodu naprázdno musíme počítat s těmito ztrátami:

$$\Delta P_0 = \Delta P_{Fe1} + \Delta P_m,$$

kde ΔP_m jsou mechanické ztráty motoru a ΔP_{Fe1} jsou ztráty v železe statoru.



Obr. 1: Ztráty motoru

- Ztráty v železe rotoru můžeme za normálního chodu zanedbat.
- O ztrátách v železe rotoru musíme uvažovat jen u strojů s dlouhým rozběhem.
- Pulsační ztráty se počítají jen u motorů s většími výkony.
- Hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy se určují měřeními na hotových strojích.
- Magnetický tok závisí jen na napětí, i ztráty v železe jsou pro každé zatížení stejné a rovnají se ztrátám v železe při chodu naprázdno!

Účinnost indukčních motorů

Účinnost je obecně dána poměrem $\eta = \frac{P}{P_1} \cdot 100 (\%)$,

kde P je výkon motoru, P_1 příkon motoru a η účinnost.

Účinnost asynchronních indukčních motorů s kotvou nakrátko je problémem celosvětovým z důvodů využívání elektrické energie, která je velmi drahá. Účinnost asynchronních motorů je určité ekonomické kritérium, které je nutno respektovat při stavbě a použití motorů v provozu.

Zlepšování účinnosti asynchronních motorů

Označíme-li si ztráty v železe a ztráty mechanické jako k (konstantní ztráty) a ztráty ve vinutí jako v (proměnlivé ztráty), pak motor může pracovat s maximální účinností, jestliže se tyto ztráty sobě rovnají:

$$k = v.$$

Jestliže ztráty rostou pomaleji než výkon, musí mít takové motory menší ztráty a tím vyšší účinnost. Účinnost motoru závisí i na jeho otáčkách. Čím větší otáčky, tím lepší účinnost. Motory s malými otáčkami pracují neohospodárně.

U některých typů dvou pólových motorů se může stát, že jejich účinnost bude horší než u stejných motorů čtyřpólových, což je dáno velkým třením. Kompenzaci lze provést zmenšením ztrát ve vinutí u vysokootáčkových motorů.

Účinnost motoru se mění také se svorkovým napětím motoru, protože ztráty ve vinutí závisí na druhé mocnině proudu a ztráty v železe na druhé mocnině magnetické indukce B lze psát:

$$\Delta P = k + v = \Delta P_m + k_1 B^2 + k_2 I_2^2.$$

Motor bude pracovat při proměnném napětí s minimálními ztrátami tehdy, jestliže ztráty ve vinutí se budou rovnat ztrátám v železe, tzn.

$$k_1 B^2 = k_2 I_2^2.$$

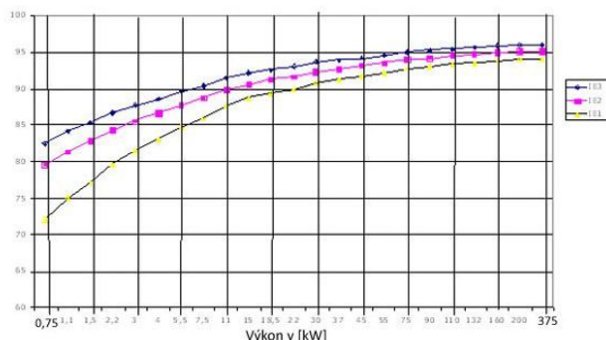
Kromě účinnosti má na provoz indukčního motoru velký vliv i **účinník $\cos \varphi$** . Proto musíme dbát na tyto zásady:

- Pokud velké motory nejsou zatíženy plným výkonem, pracují s malým účinníkem.
- Motory musí být zatěžovány kolem 75% jmenovitého výkonu.
- Přepínání motorů do hvězdy nebo do trojúhelníku, dle velikosti zatěžujícího výkonu.
- Motory nesmí běžet naprázdno – zhoršuje se účinník $\cos \varphi$ – obráběcí stroje o přestávkách.

Nutnost kompenzace pomocí statických kondenzátorů u odběratele:

- individuální kompenzace
- skupinová kompenzace
- centrální kompenzace

Starý standard pro výpočet účinnosti motorů byl nahrazen novou normou **IEC 60034-2-1**, která vstoupila v platnost v září 2007. Tento nový standard, známý jako **EN 60034-2-1**, platí jako mezinárodní standard. To znamená, že nová pravidla vstoupila v platnost pro stanovení ztrát a účinnosti motorů. Nové limity účinnosti pro různé velikosti motorů tříd IE1 a IE2 a IE3 jsou uvedeny v **IEC 60034-30**. Rozdíly v účinnosti motoru pro 4pólové motory ve třídách IE1 a IE2 a IE3 jsou znázorněny na obrázku níže.



Obr. 2: Minimální účinnost pro 4pólové motory IE1 - IE3

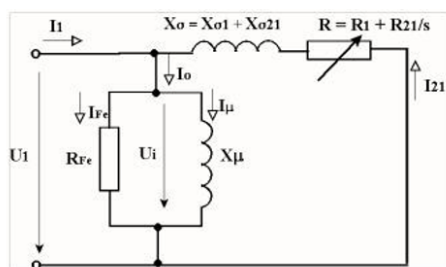
Trojfázový indukční motor – kruhový diagram

Tato lekce se zabývá konstrukcí a průběhem kruhového diagramu.

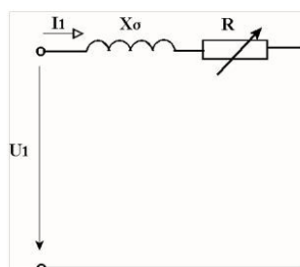
Kruhový diagram

Kruhový diagram je grafické znázornění všech prakticky i teoreticky možných poloh fázoru statorového proudu ve fázorovém diagramu. Lze poměrně jednoduše dokázat, že množina všech koncových bodů poloh fázoru statorového proudu tvoří kružnici v *Gaussově rovině*. Pro každý bod této kružnice, tedy pro jakýkoli stav asynchronního stroje, lze pak určit důležité provozní veličiny, jako je proud, účiník, příkon, výkon a skluz.

Zjednodušíme náhradní schéma ve dvou krocích tak, že přesuneme příčnou větev na vstupní svorky a v podélné větvi sečteme odpory:

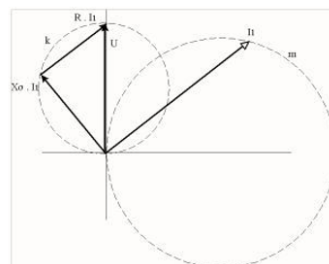


Obr. 1: Náhradní schéma



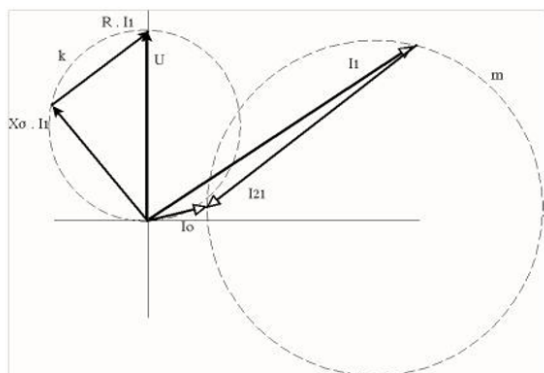
Obr. 2: Upravené náhradní schéma

Pro poslední schéma platí tento **fázorový diagram**:



Obr. 3: Fázorový diagram pro obr. 2

Předpokládáme napětí na svorkách stroje konstantní a konstantní rozptylovou reaktanci. Pro jakýkoli stav stroje, tj. pro jakýkoli skluz a tedy jakoukoli hodnotu R , pak tvoří úbytky napětí pravoúhlý trojúhelník s přeponou U , vrchol fázoru $X_{\sigma} I_1$ se tedy pohybuje po kružnici k (Thaletova věta). Proud I_1 je úměrný velikosti fázoru $X_{\sigma} I_1$ a je za tímto úbytkem zpožděn o 90° . Vrchol fázoru proudu I_1 se tedy také pohybuje po kružnici m .

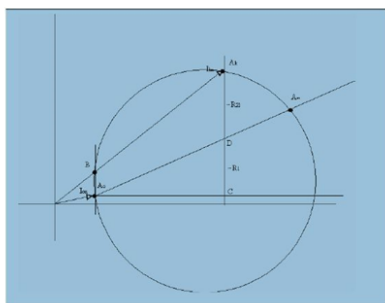


Pokud přejdeme k prvnímu schématu, změní se proud I_1 na I_{21} , který se sečte s proudem I_1 na proud I_0 . Výsledkem je posunutí kružnice m ve směru proudu I_0 . Kružnici m , kterou opisuje fázor statorového proudu pro jakýkoli stav stroje, nazýváme **kruhový** (též kružnicový) **diagram** asynchronního stroje.

Obr. 4: Fázorový diagram - pohyb fázoru proudu I po kružnici

Konstrukce kruhového diagramu

Při konstrukci kruhového diagramu (KD) lze snadno zjistit dva body kružnice z jednoduchých měření naprázdno a nakrátko. Z těchto měření určíme proudy I_{0n} a I_{kn} s jejich fázovými posuny a po vynesení těchto fázorů v měřítku m , do Gaussovy roviny (fázor napětí je ve svislé ose!) získáme body A_0 a A_k . Další postup se již u jednotlivých metod liší. My použijeme jednoduchou metodu zjištění třetího bodu kružnice: bodem A_0 spustíme kolmici k vodorovné ose a průsečík B této kolmice s fázorem proudu I_{kn} budeme považovat za třetí bod kružnice. Po vykreslení kružnice je třeba na KD zjistit třetí důležitý bod s označením A_∞ . Z bodu A_k spustíme kolmici k vodorovné ose a bodem A_0 vedeme rovnoběžku s vodorovnou osou, průsečík C je krajní bod úsečky $A_k C$. Tuto úsečku rozdělíme v poměru odporů R_1 a R_{21} tak, aby úsek CD byl úměrný odporu R_1 a $A_k D$ odporu R_{21} .



Obr. 5: Konstrukce kruhového diagramu

Odečty hodnot na kruhovém diagramu

Z KD lze pro daný stav stroje přímo odečíst velikost proudu I , fázového posunu φ , mechanického výkonu na hřídeli P , elektrického výkonu na svorkách P_p , momentu na hřídeli M a skluzu s .

•Velikost proudu je vzdálenost bodu A od počátku (velikost fázoru) v měřítku proudů m_I (A/cm).

•Fázový posun φ je úhel, který svírá fázor proudu I se svíslou osou (s fázorem napětí).

•Mechanický výkon na hřídeli P odpovídá vzdálenosti bodu A od přímky mechanických výkonů A_oA_k měřené ve směru tečny v bodě A_o v měřítku výkonů:

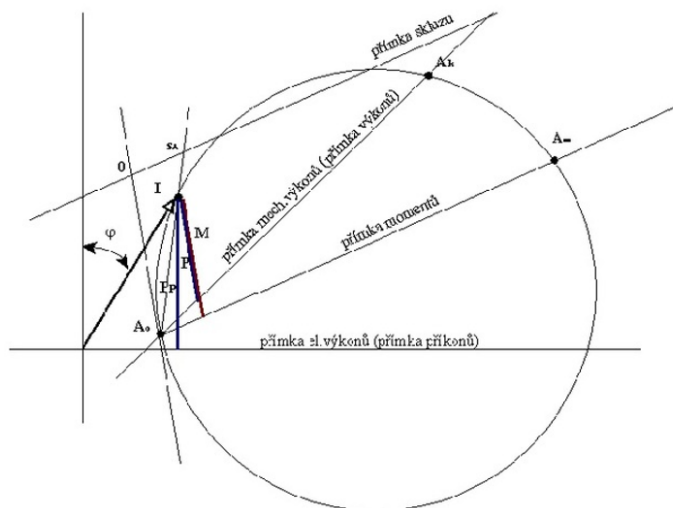
$$m_P = 3 \cdot U_f \cdot m_I \text{ (W/cm)}.$$

•Elektrický výkon na svorkách P_p odpovídá kolmé vzdálenosti bodu A od vodorovné osy - přímky elektrických výkonů v měřítku výkonů.

•Moment stroje M odpovídá vzdálenost bodu A od přímky momentů A_oA_∞ měřené ve směru tečny v bodě A_o v měřítku momentů: $m_M = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{m_P}{n_s}$ (Nm/cm).

•Skluz odečteme na přímce skluzu - přímka rovnoběžná s přímkou momentů, pomocí spojnice bodu A_o s bodem A . Stupnice je lineární, body s hodnotami 0 a 1 zjistíme pomocí skluzů v bodě A_o ($s = 0$, zde tečna v bodě A_o) a A_k ($s = 1$).

Obr. 6: Odečty z kruhového diagramu



Stavy stroje na kruhovém diagramu

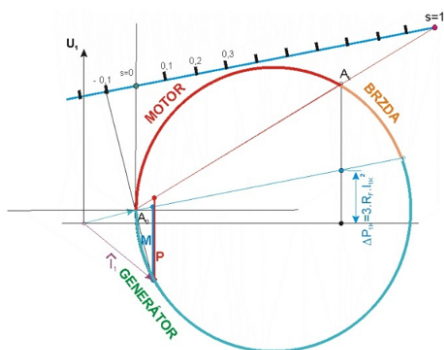
Asynchronní stroj může pracovat ve třech stavech:

- motor
- generátor
- Brzda

Nejčastěji je asynchronní stroj používán jako **motor**. Stroj má zátěž na hřídeli, jeho otáčky jsou menší než synchronní, skluz je v rozmezí **0-1**. Na KD je motorická oblast mezi bodem A_0 (stroj bez zátěže) a bodem A_k (zabrzdný stroj).

Pokud budeme stroj mechanicky pohánět, otáčky stoupnou do nadsynchronní oblasti (záporný skluz $s < 0$) a stroj se stane **generátorem** – a začne dodávat elektrickou energii do sítě. V tomto stavu je činná složka proudu v protifázi s napětím, tomu odpovídá v KD část kružnice pod vodorovnou osou. Asynchronní generátory se používají v malých vodních elektrárnách.

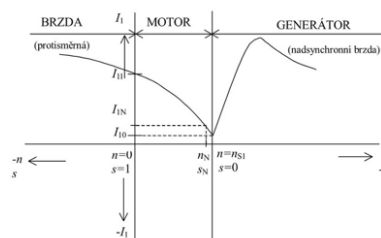
Jestliže bude v motorickém stavu moment na hřídeli příliš velký a motor se zastaví a začne se pak otáčet proti směru točivého pole, stane se **brzdou** ($s > 1$). Brzdná oblast je tedy na KD mezi body A_k a A_∞ . Ve stavu brzdy odebírá stroj ze sítě proud, který je větší než I_{kn} !



Obr. 7: Stavy motoru na KD

Tečkovaně jsou znázorněny „rozumné“ oblasti v jednotlivých stavech (jmenovitý chod motoru a generátoru, stav brzdy při změně točivého pole).

Obr. 8: Momentová charakteristika



Trojfázový indukční motor – spouštění

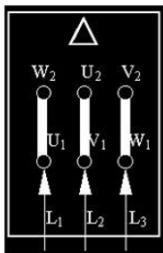
Tato lekce se zabývá spouštěním indukčního asynchronního motoru.

Princip činnosti

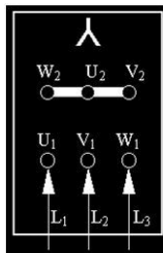
Každý asynchronní motor připojený přímo k síti odebírá velký proud nakrátko. Vznikne vždy velký proudový náraz, který je příčinou poklesu napětí v síti a zmenšení momentů všech indukčních motorů pracujících ve stejné síti. Tento proudový náraz je jedním z největších provozních problémů indukčních motorů. Bývá $I_z = (4 - 8) \cdot I_n$.

Pro spouštění indukčních motorů je vhodné, aby byl **záběrný proud malý a záběrný moment byl co největší**.

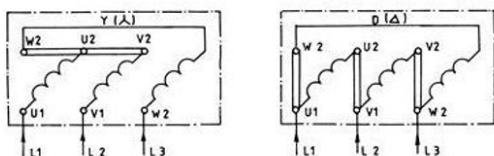
Připojování indukčních motorů umožňuje satorová svorkovnice.



Obr. 1: Zapojení do trojúhelníka



Obr. 2: Zapojení do hvězdy



Obr. 3: Vnitřní zapojení svorkovnic

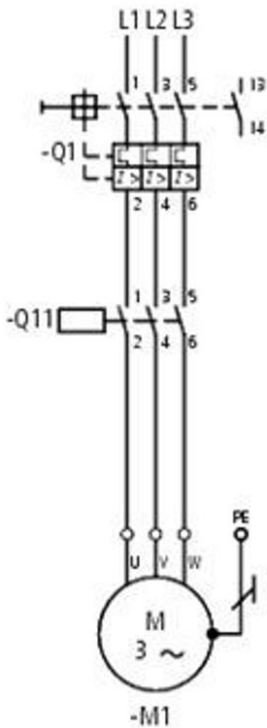
Způsoby spouštění indukčních motorů nakrátko

V praxi se nejčastěji používají tyto způsoby spouštění:

- přímé, plným napětím
- přepínačem Y/D
- frekvenčním měničem
- rozběhovou spojkou
- satorovým spouštěčem
- Autotransfátorem

Spouštění přímé, plným napětím

Jedná se o nejjednodušší způsob rozběhu, kdy motor přímo připojíme k síti na plné napětí. Tohoto způsobu lze použít dle ČSN jen do výkonu 22 kVA. Tomuto způsobu rozběhu dáváme přednost, jestliže potřebujeme rozběh s plným zatížením.



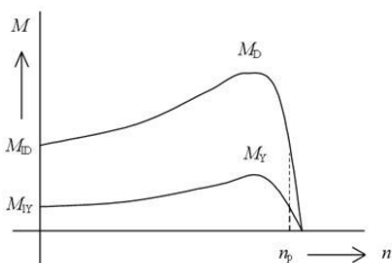
Obr. 4: Přímý rozběh motoru, kde Q_1 je jištění motoru a Q_{11} vypínač motoru

Spouštění přepínáním hvězda-trojúhelník

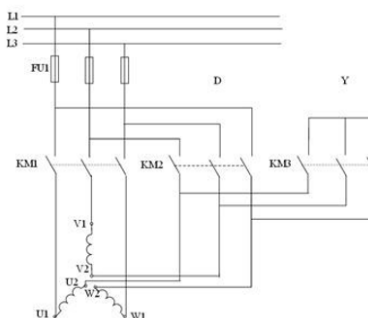
Jedná se o nejrozšířenější a nejlevnější způsob zapínání motorů s větším výkonem od 5kW výše, kdy motor nejprve zapneme do hvězdy – kdy motor bude mít ve hvězdě nižší napětí na fázi statoru (230V) a po určitém časovém intervalu 10 -15 s přepneme do trojúhelníku, kdy bude na fázi statoru napětí vyšší a to 400V. Tento rozběh se pro vysoké výkony nepoužívá, použití je v oblasti nižších výkonů.

Vlastnosti:

- pro třífázové motory malého výkonu
- snížený spouštěcí proud
- šest připojovacích vedení
- snížený rozběhový moment
- proudová špička při přepnutí z hvězdy na trojúhelník
- mechanické zatížení při přepnutí z hvězdy na trojúhelník



Obr. 5: Charakteristiky MY a MD



Obr. 6: Zapojení hvězda-trojúhelník pomocí stykačů

Spouštění frekvenčním měničem

Jedná se o rozšířený moderní způsob rozběhu motorů změnou frekvence. Otáčky motoru jsou přímo úměrné síťové frekvenci a tím lze plynule rozbíhat motor. Se změnou frekvence se musí měnit i napájecí napětí a tím dosáhneme konstantního momentu motoru. Při spouštění plynulou frekvencí vytváří motor maximální záběrný moment, jestliže se napájí frekvencí:

$$f = \frac{f_1}{\text{tg}\varphi_k}, \quad n = \frac{60f_1}{p}(1-s),$$

kde f_1 je síťová frekvence a φ_k je úhel vyplývající z účinníku nakrátko.

Pro otáčky motoru platí

kde p je počet pólových dvojic, f_1 je frekvence sítě.



Toto řízení napětí/frekvence umožňuje plynulé řízení rychlosti třífázových motorů. Pohon může být provozován se jmenovitým zatěžovacím momentem i při nízkých rychlostech. Měníče frekvence jsou vhodné pro napájení indukčních motorů s velkými otáčkami (dřevoobráběcí stroje, odstředivky apod.)

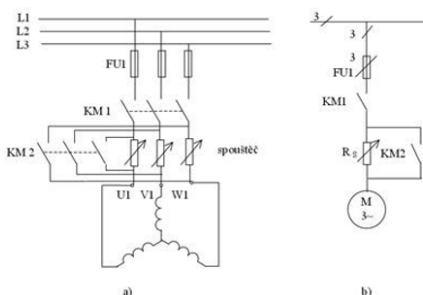
Obr. 7: Frekvenční měnič

Spouštění rozběhovou spojkou

Rozběhovou spojkou lze spustit nezátížený motor a na konci rozběhu ho lze spojit s pracovním strojem a tím se omezí počáteční proudový náraz. Používají se rozběhové třecí spojky a odstředivé automatické spojky – asi do výkonu 15kW, dále pak elektrodynamické skluzové spojky pro výkony větší než 100 kW.

Spouštění satorovým spouštěčem

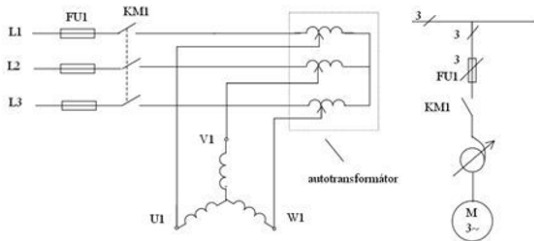
Do obvodu statoru se zabuduje odporový spouštěč a postupným zvyšováním napětí na statoru se bude zvyšovat i záběrný proud i moment. U nás se moc nepoužívá.



Obr. 8: Schéma zapojení: a) třífázové schéma, b) jednofázové schéma

Spouštění autotransfornátorem

má několik odboček ($0,5, 0,6, 0,8 U_1$) pro volbu vhodného převodu a napětí. Tím se volí i vhodný záběrný moment a záběrný proud. Výhodou spouštěcího autotrafo je, že snížení záběrného momentu je úměrné pouze snížení proudového nárazu, přičemž snížení proudového nárazu je úměrné kvadrátu převodu p .



Obr. 9: Schéma zapojení: a) třípólové schéma, b) jednopólové schéma

Trojfázový indukční motor – brzdění

Tato lekce se zabývá způsoby zastavení indukčních strojů.

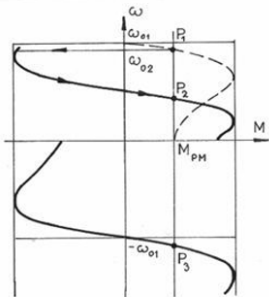
Brzdění indukčních asynchronních motorů

Stejně jako u stejnosměrných cize buzených motorů existují tři základní způsoby brzdění:

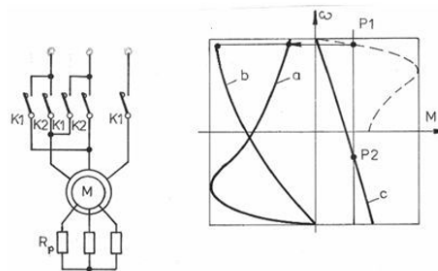
- generátorické (rekuperační)
- protiproudé
- stejnosměrné (dynamické)

Generátorické brzdění

Při zvýšení rychlosti nad ω_0 se dostává motor do oblasti generátorického, tj. rekuperačního brzdění, kde je skluz $s < 0$. Jiná možnost, jak dosáhnout tohoto režimu, je snížení rychlosti $\omega_0 = 60f/p_p$ (p_p je počet pólpárů), čehož lze dosáhnout snížením frekvence napájecího napětí f (tohoto způsobu se používá právě u – dnes by se dalo říci již hromadně používaných – měničů kmitočtu), anebo přepnutím vinutí na vyšší počet pólpárů p_p (výtahové motory). Pracovní bod se při tom pohybuje z bodu P_1 do P_2 nebo při brzdném spouštění břemene do P_3 .



Obr. 1: Momentová charakteristika



Obr. 2: Schéma zapojení a mechanické charakteristiky protiproudého brzdění

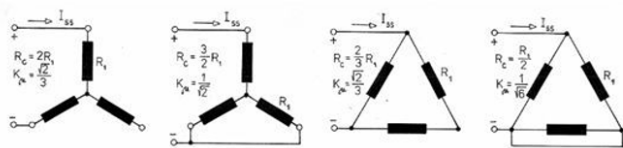
Brzdění protiproudem

Obrácením sledu fází napájecího napětí dojde ke změně smyslu točivého pole, takže rotor se otáčí proti smyslu pole (křivka **a**), skluz $s > 1$. Indukované napětí U_{20} i rotorová frekvence $f_2 = s \cdot f_1$ vzrostou v okamžiku přepnutí téměř na dvojnásobek ($s = 2$). Proto u kroužkového motoru je zapotřebí zařadit do každé fáze rotoru odpor dvojnásobné hodnoty, než je odpor pro spouštění (křivka **b**). K zabránění rozběhu v protisměru je nutno motor při dosažení nulové rychlosti odpojit od sítě, např. odstředivým vypínačem. Při brzděném spouštění břemene je pracovní bod P_2 ve IV. kvadrantu. U motorů nakrátko je při přepnutí náraz statorového proudu asi o 20% větší než při přímém připojení na síť, navíc všechno teplo se vyvíjí v rotoru. Tyto skutečnosti omezují rozsah výkonů, kde lze použít protisměrného brzdění u motorů nakrátko.

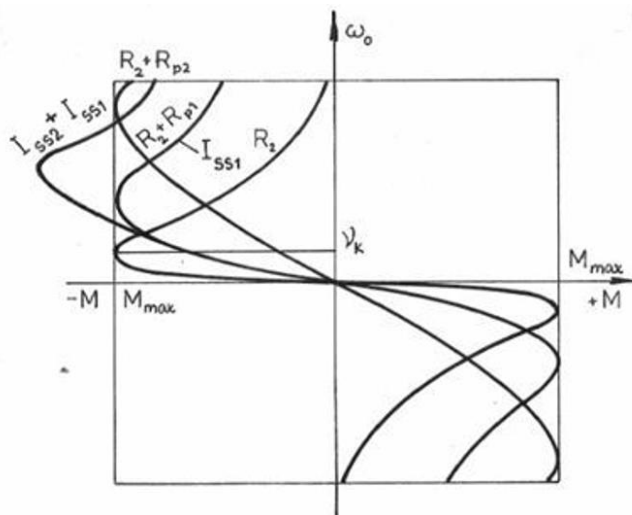
Stejnsměrné brzdění

Při stejnosměrném brzdění se odpojí stator od střídavé sítě a připojí se na zdroj stejnosměrného napětí. Nejčastější zapojení statoru jsou znázorněny na obr. 3, včetně celkového odporu R_c a činitele magnetizačního proudu K_μ . Při dynamickém brzdění se stroj chová jako střídavý generátor. Energie se ztrácí ve formě tepla v rotorových odporech.

Stejnsměrný proud statoru I_{ss} vytvoří stojící magnetické pole, v němž se otáčí kotva motoru. Tvar mechanických charakteristik je na obrázku, kde vystupuje poměrná rychlost v . Na vlastní charakteristice je v velmi malé, což vede k malému brzděnému momentu při vyšších rychlostech. Proto u větších motorů se zařazuje do rotoru přídavný odpor R_p , který se může postupně vyřazovat – pouze u kroužkových motorů. V kombinaci s řízením budícího proudu I_{ss} lze splnit libovolné požadavky na tvar charakteristik.



Obr. 3: Zapojení statoru u ss brzdění



Obr. 4: Mechanické charakteristiky ss brzdění

Trojfázový indukční motor – řízení otáček

Tato lekce se zabývá regulací otáček indukčního motoru.

Řízení otáček asynchronního motoru

Základní rovnice pro synchronní otáčky

$$n_s = 60 \cdot f/p$$

kde n_s jsou synchronní otáčky, f je frekvence přivedeného proudu a p je počet pólových dvojic magnetického pole.

Z rovnice pro skluz
$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

můžeme odvodit vztah pro otáčky rotoru asynchronního motoru:
$$n = \frac{60f_1}{p}(1-s).$$

Otáčky rotoru tedy závisí na:

- frekvenci přivedeného proudu f_1 (Hz)
- počtu pólových dvojic magnetického pole p
- skluzu s

Řízení otáček změnou skluzu lze použít pouze u motoru s kroužkovou kotvou. Místo spouštěče se použije reostat, kterým měníme odpor vinutí kotvy a tím se mění také skluz.

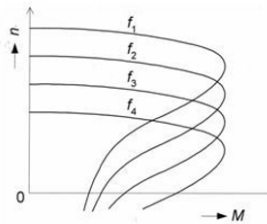
Řízení otáček změnou počtu pólů – ve statoru je několik skupin cívek, přepínáním mezi jednotlivými skupinami cívek se mění počet pólových dvojic magnetického pole a mění se otáčky. Tento způsob umožňuje změnu otáček skokem. Používá se jen u motorů s kotvou nakrátko.

Změnu počtu pólů uskutečníme tak, že do drážek statoru vložíme dvě samostatná vinutí, např. čtyřpólové a šestipólové. Podle toho, které vinutí připojíme přepínačem na síť, má magnetické pole statoru synchronní otáčky 1500 za minutu nebo 1000 za minutu. Otáčky rotoru se pak změní v poměru otáček magnetického pole statoru.

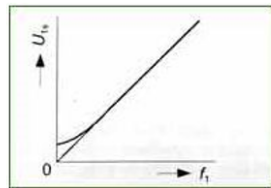
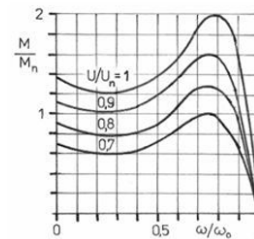
Řízení otáček změnou frekvence – v dnešní době se používají polovodičové (tyristorové) měniče frekvence, která se mění od 10 do 100Hz. To umožňuje plynulou změnu otáček. Změna kmitočtu napájecího napětí představuje nejpoužívanější a nejdokonalejší, bezztrátový způsob řízení. S ohledem na využití motoru je třeba udržovat konstantní hodnotu poměru vazebního magnetického toku (magnetického spřažení) statoru a napájecího kmitočtu, což zhruba odpovídá konstantní hodnotě poměru statorového napětí a jeho kmitočtu. Tento způsob řízení se uplatňuje až do dosažení jmenovitého statorového napětí.

Nejvíce rozšířené je použití nepřímého měniče kmitočtu s napětovým střídačem s diodovým vstupním usměrňovačem a střídačem s tranzistorem IGBT.

Dokonalejší je pulzně-šířkové řízení (PWM), podstatně omezující výskyt harmonických vyšších řádů a vylučující vliv setrvačnosti napětového meziobvodu. Nejčastěji pomocí frekvenčních měničů, někdy se zřizuje i zvláštní síť s upraveným kmitočtem.



Obr. 1: Řízení změnou frekvence

Obr. 2: Závislost U na f Obr. 3: Závislost M na f

Jednofázový indukční motor

Tento výukový modul se zabývá jednofázovým indukčním asynchronním motorem s kotvou nakrátko. Zahrnuje principy, poznatky z jednotlivých provozních stavů, zapojení statorového vinutí, regulace otáček, brzdění, rozběh, momentové charakteristiky a energetickou bilanci zařízení.

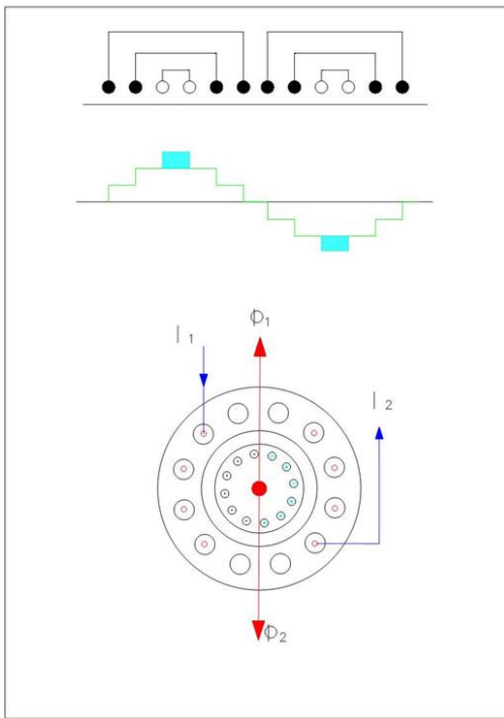
Jednofázový indukční motor - princip činnosti

Tato lekce se zabývá principem činnosti a konstrukcí indukčního jednofázového motoru. Pro pohon malých zařízení s výkonem do 1 kW se běžně používají asynchronní motory napájené z jednofázové sítě. Je nejvíce používán v chladničkách, pračkách, ždímačkách, hodinách, vrtačkách, malých kompresorech, pumpách atd. Nevýhodou je induktivní účinník, způsobující jalové zatížení sítě.

Princip činnosti

V jednofázovém statorovém vinutí se střídavým proudem budí střídavý magnetický tok Φ_1 , a je-li rotor v klidu, indukuje se v něm transformační napětí. V tyčích klece protéká velký proud nakrátko a budí jako u transformátoru magnetický tok Φ_2 opačného smyslu než má magnetický tok Φ_1 . Vektorový součet obou toků je výsledný magnetický tok Φ .

Magnetické toky Φ_1 a Φ_2 svírají úhel 180° , takže nevytvoří žádný mechanický moment, proto se jednofázový indukční motor z klidu sám nerozběhne. Roztočíme-li však motor v kterémkoli směru, indukuje se v rotoru pohybové napětí, které se skládá s transformačním napětím v napětí výsledné. Proud rotoru pak budí magnetický tok rotoru, který je s polem statoru posunut o méně než 180° a vytvoří točivý moment. Rychlost závisí, jako u trojfázového indukčního motoru, na kmitočtu a počtu pólů stroje.



Obr. 1: Princip

Na rotor působí proti sobě dva točivé momenty, moment souběžný a moment protiběžný. Výsledný moment je dán rozdílem obou momentů. Je-li rotor v klidu, je výsledný moment nulový, neboť oba momenty se ruší. Výsledný moment se zvětšuje z klidu na obě strany, takže motor se otáčí v tom směru, ve kterém dostal počáteční impulz.

Rozběhy jednofázových motorů

•Indukční motory s pomocnou fází

Tento typ motoru má dobrou účinnost a středně velký rozběhový moment. Jsou hodně používány jako hnací motory praček, sušicích bubnů a myček na nádobí.

•Indukční motory s kapacitním rozběhem

Mají stejnou provozní výkonnost jako indukční motory s pomocnou fází, ale větší rozběhový moment. Jsou používány hlavně jako pohony praček.

•Motory s trvale připojeným kondenzátorem

Hlavními vlastnostmi tohoto typu motoru je vysoká účinnost, tichý chod a trvalý reverzační provoz. Jsou vhodné pro použití v širokém rozsahu domácích přístrojů, např. praček, sušicích bubnů, ventilátorů a klimatizací.

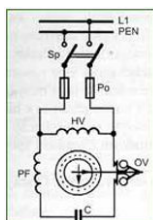
•Jednofázové motory se stíněným pólem

Jsou vhodné pro aplikaci s nízkým výkonem (menším než 200 W). Obvykle se používá v malých domácích ventilátorech.

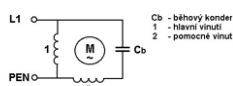
Principy rozběhů jednofázových motorů

Aby se jednofázový motor sám roztočil, přidává se na stator pomocná fáze, která se po rozběhu samočinně vypne, např. odstředivým vypínačem (OV). Vinutí pomocné fáze, tzv. **rozběhové vinutí**, bývá ve třetině vynechaných drážek statoru. Pomocnou fází (PF) a hlavním vinutím (HV) statoru se z jednofázové přípojky budí fázově navzájem posunutými proudy dvě vzájemně posunutá střídavá magnetická pole, která dávají výsledné točivé magnetické pole.

Posunutí proudu v pomocné fázi dosáhneme zapojením činného odporu, tlumivky nebo kondenzátoru do obvodu pomocné fáze. Tento typ motoru má dobrou účinnost a středně velký rozběhový moment J_{s0} hodně používány jako hnací motory praček, sušících bubnů a myček na nádobí.



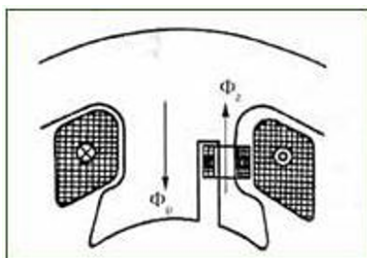
a)



b)

Obr. 2: a) Zapojení s pomocným vinutím rozběhovým kondenzátorem b) Zapojení s trvalým kondenzátorem

Malé motory, např. ventilátorové, mívají **stíněný pól**. Statorové vinutí není rozloženo a uloženo v drážkách, nýbrž je na vyniklých pólech. Póly mají nesouměrný výřez s cívkou nebo se závitem nakrátko.



Obr. 3: Stíněný pól malých motorů

Statorovým proudem se budí hlavní magnetický tok Φ_p , který indukuje v závitu proud opačného směru, než má proud ve statorovém vinutí. Proud v závitu budí v části pólu magnetický tok Φ_z , který směřuje proti hlavnímu toku pólu. Tyto toky se liší polohou i časem a tím dostane rotor impulz k roztočení. Takový motor se otáčí jen v jednom směru.

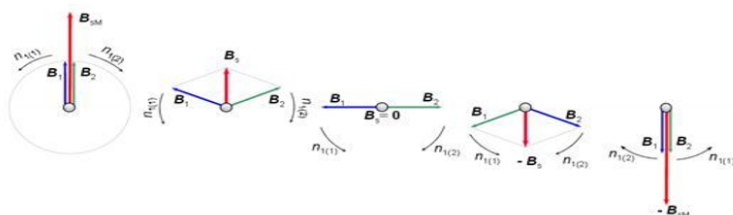
Jednofázový indukční motor - moment

Tato lekce se zabývá momentem jednofázového indukčního motoru.

Popis vzniku momentu

Magnetické toky Φ_1 a Φ_2 svírají úhel 180° , takže nevytvoří žádný mechanický moment, proto se jednofázový indukční motor z klidu sám nerozběhne.

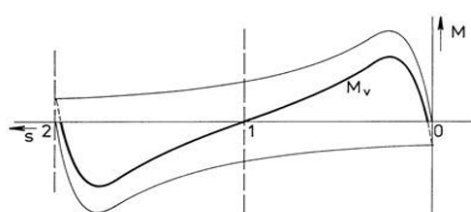
Náhrada stojatého magnetického pole dvěma točivými protiběžnými magnetickými poli:



Obr. 1: Magnetické pole při jedné otáčce

Momentová charakteristika

Na rotor působí proti sobě dva točivé momenty, moment souběžný a moment protiběžný. Výsledný moment je dán rozdílem obou momentů. Je-li rotor v klidu, je výsledný moment nulový, neboť oba momenty se ruší. Výsledný moment se zvětšuje z klidu na obě strany, takže motor se otáčí v tom směru, ve kterém dostal počáteční impuls.

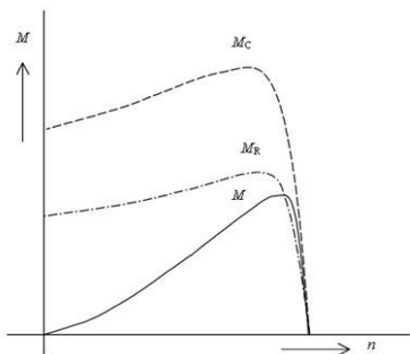


Obr. 2: Momentová charakteristika

Tento impuls lze dát:

- rozběhovým kondenzátorem
- odporovou pomocnou fází

Momentová charakteristika jednofázového asynchronního motoru je na obrázku, kde jsou srovnány momentové charakteristiky motoru bez pomocné fáze, s odporovou pomocnou fází a s rozběhovým kondenzátorem.



Obr. 3: Momentové charakteristiky jednofázových motorů: **MC** – s rozběhovým kondenzátorem, **MR** – s odporovou pomocnou fází, **M** – bez pomocné fáze

Změnu směru otáčení jednofázového asynchronního motoru lze provést přehozením konců vinutí pomocné nebo hlavní fáze. Otáčky motoru jsou podobně jako u trojfázového asynchronního motoru závislé na kmitočtu napájecího napětí a na počtu pólů.

Jednofázový indukční motor – konstrukce

Tato lekce se zabývá principem činnosti a konstrukcí indukčního jednofázového motoru.

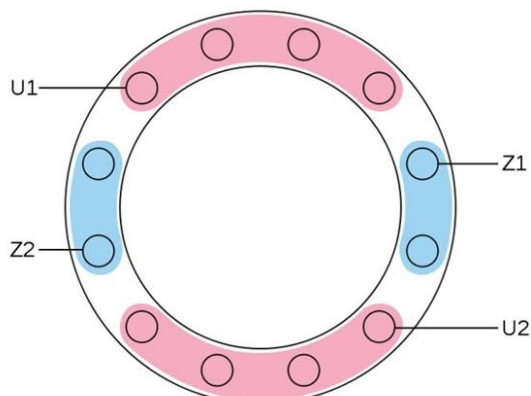
Pro pohon malých zařízení s výkonem do 1 kW se běžně používají asynchronní motory napájené z jednofázové sítě. Je nejvíce používán v chladničkách, pračkách, ždímačkách, hodinách, vrtačkách, malých kompresorech, pumpách, atd. Nevýhodou je induktivní účinník způsobující jalové zatížení sítě a dále nulový rozběhový moment.



Obr. 1: Jednofázové motory

Konstrukční provedení

Od třífázového motoru se liší tím, že jeho vinutí je ve 2/3 drážek statoru. Ve zbývajících 1/3 drážek je uloženo vinutí pomocné, tzv. **rozběhové vinutí**, které je kolmo k hlavnímu vinutí (otočeno o 90°).



Obr. 2: Princip konstrukce jednofázového motoru, kde **U₂** je hlavní vinutí a **Z₁** je pomocné vinutí



Obr. 3: Konstrukční provedení

Synchronní stroje

V tomto výukovém modulu se seznámíme s principem činnosti a konstrukcí synchronních strojů. Budeme se věnovat podrobnému popisu stavu naprázdno, při zatížení a chodu nakrátko. V případě alternátorů si popíšeme způsoby řízení výstupního napětí, u motorů se budeme věnovat možnostem řízení otáček. Představíme si také konstrukční uspořádání a využití jednotlivých typů synchronních strojů.

Princip činnosti a konstrukce

Dle základního rozdělení elektrických strojů patří synchronní stroje mezi točivé střídavé. U synchronních strojů se rotor otáčí stejnými otáčkami jako magnetické pole statoru, čímž se odlišuje od strojů asynchronních. Hovoříme o tzv. **synchronních otáčkách**.

Rozdělení

Synchronní stroje mohou pracovat jako:

- alternátory (synchronní generátory)
 - turboalternátory
 - hydroalternátory

- synchronní motory
- synchronní kompenzátory
- synchronní konvertory

Speciálním provedením synchronního motoru je potom **krokový motor**.

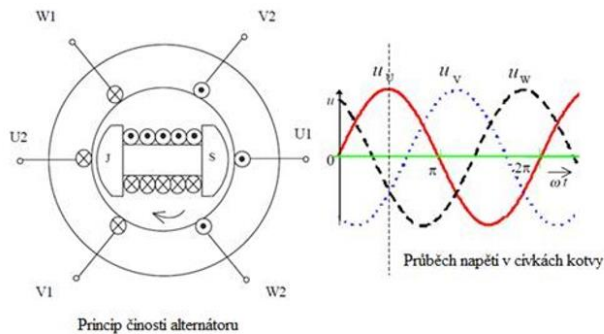
Princip činnosti Generátor

Generátory obecně slouží k přeměně mechanické energie na elektrickou. Otáčí-li tedy např. turbína nabuzeným rotorem, indukuje se v jednotlivých cívkách statoru střídavé napětí. Tyto cívky jsou vůči sobě natočeny o 120°, a tedy i okamžité hodnoty indukovaného napětí jsou časově posunuté právě o tento úhel.

Po připojení trojfázové zátěže ke svorkám vinutí statoru, začne vinutím procházet elektrický proud. Tento proud způsobí vznik točivého magnetického pole, které má stejnou rychlost otáčení jako rotor a jeho magnetické pole.

Skuz, tedy rozdíl otáček statoru a rotoru, je v tomto případě na rozdíl od asynchronních strojů nulový. Pro synchronní otáčky platí vztah

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad [ot/min] \quad \text{kde } f \text{ je frekvence napětí [Hz] a } p \text{ počet pólových dvojic}$$



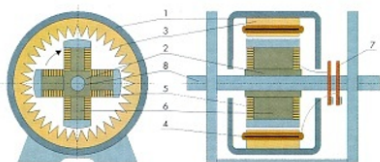
Obr. 1: Princip činnosti alternátoru

Motor

Konstrukčně se podobá synchronnímu alternátoru. Ke statoru je přivedeno třífázové střídavé napětí. Statorovými cívkami protéká elektrický proud, který vytvoří točivé magnetické pole. Rotor, který vytváří magnetický tok, je do tohoto točivého pole vtažen a otáčí se se stejnými (synchronními) otáčkami.

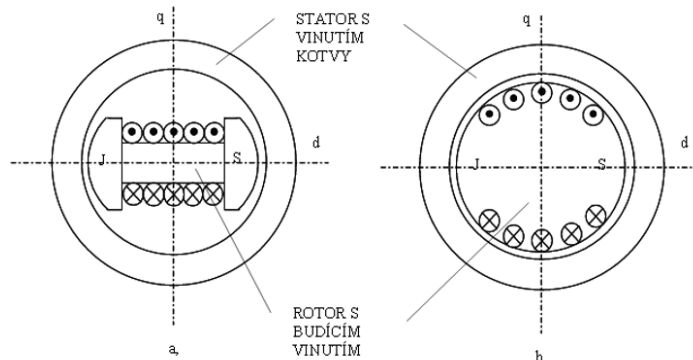
Konstrukce

Hlavní části synchronních strojů se neliší od ostatních točivých strojů. Tvoří je tedy **stator** a **rotor**. Podobně jako je konstruován stator u asynchronních strojů, je tomu i u synchronních. V drážkách statoru je nejčastěji uloženo třífázové vinutí. Rotorové vinutí je buzeno stejnosměrným proudem, který je na cívkky rotoru přiváděn přes sběrací kroužky a kartáče. U malých strojů může být vinutí nahrazeno permanentními magnety.



Obr. 2: Konstrukce synchronních strojů

- Podle provedení rotoru rozlišujeme:
- stroje s vyniklými póly (hydrostroje)
 - stroje s hladkým rotorem (turbostroje)



Obr. 3: Provedení synchronních strojů

Rotor s vyniklými póly má po obvodu póly s cívkami napájenými stejnosměrným proudem. Tento proud je odebírán z tzv. budiče, jímž nejčastěji bývá dynamo s paralelním buzením. V případě hladkého rotoru se jedná o hladký válec s podélnými drážkami, ve kterých je uloženo budící vinutí. Obvykle mívá jednu nebo dvě pólové dvojice.

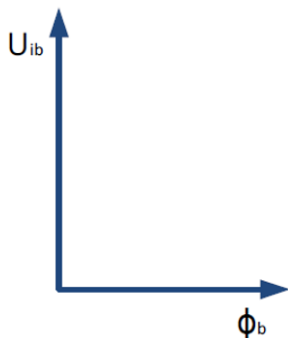
Chod naprázdno

O chodu naprázdno hovoříme tehdy, není-li v případě generátoru odebírán ze satorového vinutí žádný elektrický proud a není k němu připojena žádná zátěž. Do sítě není dodávána elektrická energie.

U motoru tento stav představuje nulové mechanické zatížení, tedy stav, kdy neodebíráme žádný mechanický výkon kromě krytí ztrát v konstrukčním uspořádání mechanických částí.

Běží-li stroj naprázdno, je **zatěžovací úhel β** mezi fázorem vstupního napětí U a indukovaným napětím rotoru U_{ib} **nulový**. Jedná se o úhel mezi magnetickým polem satoru a rotoru.

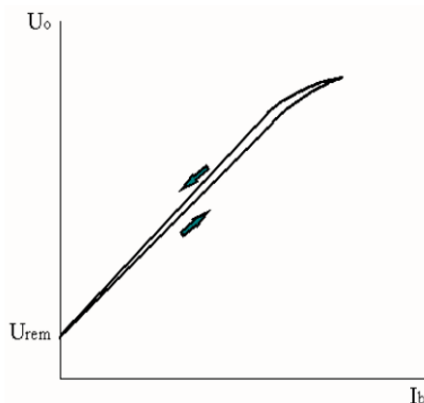
Z fázorového diagramu níže vidíme, že indukované napětí U_{ib} předbíhá magnetický tok o 90° .



Obr. 1: Fázorový diagram

Na dalším obrázku je znázorněna magnetizační křivka, která je z počátku lineární a následně se zakřivuje vlivem sycení. I při $I_b = 0$ se remanentní indukci indukuje do satoru malé remanentní napětí U_{rem} .

Obr. 2: Magnetizační křivka



Stroj při zatížení Reakce kotvy

U elektrických strojů je kotvou nazývána ta část stroje, do které je indukováno napětí. Pracuje-li synchronní stroj jako motor je potom kotvou rotor. V případě generátoru je kotvou sator.

Po připojení zátěže protéká satorovým vinutím proud, který vytvoří točivé magnetické pole. Toto pole se sčítá s magnetickým tokem rotoru a vytvoří se výsledné pole nazývané **reakční magnetické pole** (reakční magnetický tok), které značíme ϕ_a .

Výsledné magnetické pole je pak dáno fázorovým součtem otáčejícího se magnetického toku rotoru ϕ_b a reakčního toku ϕ_a . $\vec{\phi} = \vec{\phi}_a + \vec{\phi}_b$

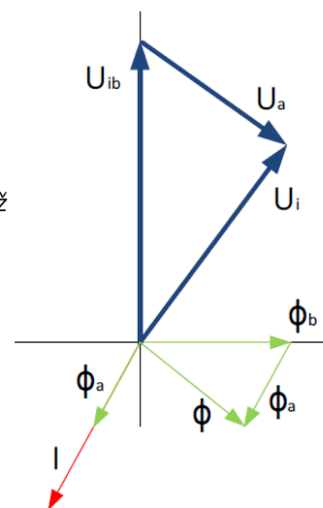
Reakci kotvy potom rozumíme vliv satorového pole na celkové pole stroje.

Fázorový diagram reakce kotvy

Proud statoru I je zde zakreslen pro induktivní charakter zátěže.

Obr. 1: Fázorový diagram pro induktivní zátěž

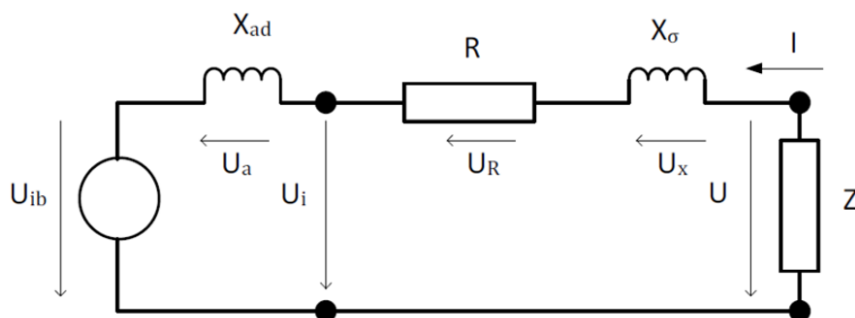
$$\vec{U}_i = \vec{U}_a + \vec{U}_{ib}$$



Z uvedeného fázorového diagramu je patrné, že zatěžovací proud I (proud statoru) je ve fázi s reaktivním tokem ϕ_a .

Výsledné indukované napětí U_i je potom dáno vektorovým součtem indukovaného napětí v kotvě U_{ib} a napětím indukovaným ve vinutí kotvy vlivem reakce kotvy U_a

Úplné náhradní schéma a fázorový diagram



Obr. 2: Náhradní schéma

Napětí U je svorkové napětí alternátoru a proud I vyjadřuje proud tekoucí do připojené zátěže. Toto napětí můžeme vyjádřit:

$$U = U_i + U_R + U_X$$

Napětí U_R představuje úbytek napětí na činném odporu vinutí kotvy.

$$U_R = R \cdot I$$

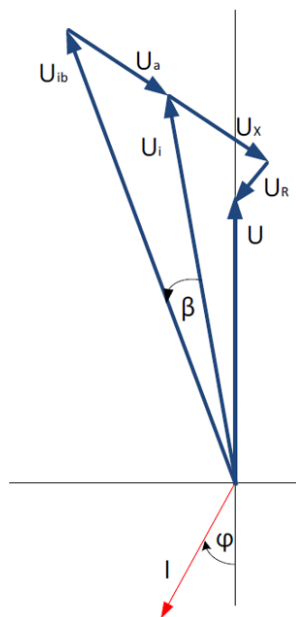
Napětí U_X představuje úbytek napětí na indukční reaktanci.

$$U_X = X_\sigma \cdot I$$

Úbytek napětí na reaktanci je potom vyjádřen.

$$U_a = X_{ad} \cdot I$$

V následujícím fázorovém diagramu budeme opět předpokládat indukční zátěž.



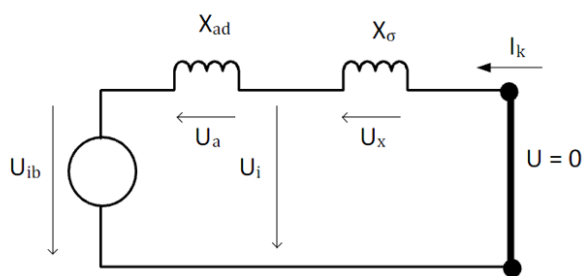
Obr. 3: Úplný fázorový diagram pro indukční zátěž

Chod nakrátko

Jestliže u generátoru zkratujeme jeho výstupní svorky a napájené budící vinutí má synchronní rychlost, hovoříme o stavu nakrátko.

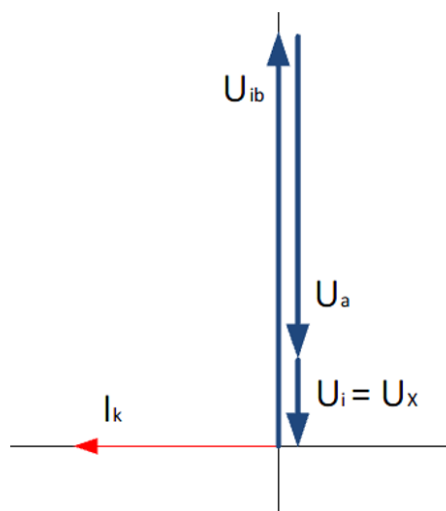
Při tomto stavu sledujeme stroj při malých změnách, které probíhají ve značně delších časových úsecích, než jsou časové konstanty přechodových dějů.

Proto, abychom si tento stav vysvětlili, použijeme náhradní schéma, ve kterém budeme rozlišovat pouze reaktance X_{ad} a X_{σ} a zanedbáme přitom odpor statorového vinutí R .



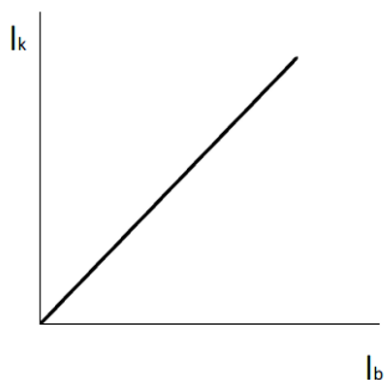
Obr. 1: Náhradní schéma

Z fázorového diagramu je patrné, že reakce statoru působí proti toku budícího vinutí. Reakce kotvy tedy způsobuje značné odbuzení stroje. Výsledný tok je proto velmi malý a indukované napětí U_i je dáno pouze rozptylovým tokem $U_i = U_x = X_\sigma \cdot I_k$



Obr. 2: Fázorový diagram

Na následujícím obrázku je zobrazena závislost budícího proudu I_b na proudu zkratovém I_k . Tato charakteristika je z důvodu stálé reaktance, v důsledku malého sycení, lineární.



Obr. 3: Závislost budícího proudu na zkratovém proudu

Ustálený proud nakrátko I_k je poměrně malý. U turboalternátorů se pohybuje kolem 0,5 proudu jmenovitého. U hydroalternátoru je to přibližně 1 až 1.4 násobek jmenovitého proudu.

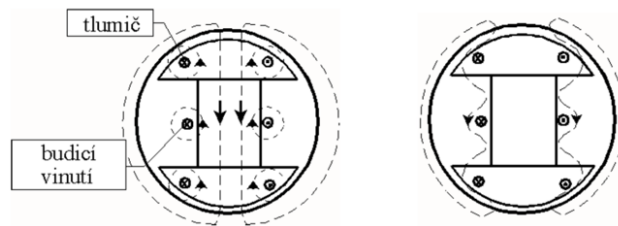
Zkrat

Zkrat nastává při náhlém galvanickém spojení výstupních svorek. V tomto okamžiku dochází k přechodovým jevům, po jejichž odeznění se stroj dostává do stavu nakrátko.

"Při zkratu je proud omezen pouze reaktancemi stroje. Vliv odporu je zanedbatelný. Proud do kotvy se značně zvýší a tím i reakční tok. Tato změna naindukuje do budícího vinutí napětí. Protože je toto vinutí uzavřeno přes budič, vyvolaný proud se snaží dle Lencova zákona působit proti této změně.

V důsledku toho je tok vytlačen do vzduchových cest a dojde ke značnému snížení synchronní reaktance na hodnotu **přechodné reaktance** $X'_{d'}$."

"Podobně je tomu i v oblasti tlumiče, kterým je konstrukčně kotva nakrátko umístěná v pólových nástavcích, a slouží k utlumení kývání stroje. Synchronní reaktance se nadále zmenší na hodnotu **rázové reaktance** $X''_{d'}$."



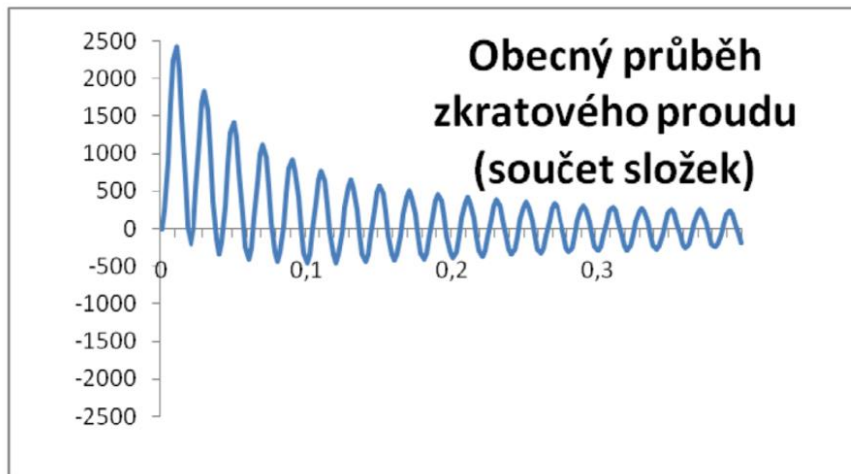
Obr. 1: Znázornění magnetických toků

Při náhlé změně zátěže se do tlumícího vinutí (tyče spojené nakrátko) indukuje napětí. V důsledku toho protéká proud, který vytvoří magnetické pole působící proti hlavnímu poli a kývání se exponenciálně tlumí. Celý děj končí ustálením na hodnotě zkratového proudu.

Zkratový proud lze rozložit na 4 složky:

- rázová složka – závisí na přechodových dějích v oblasti tlumiče
- přechodná složka - závisí na přechodových dějích v oblasti budícího vinutí
- ustálená složka – jedná se o proud, který protéká vinutím po odeznění – proud nakrátko
- stejnoseměrná složka – souvisí s energií magnetického pole v magnetickém obvodu v okamžiku zkratu

Na následujícím obrázku je znázorněn obecný průběh zkratového proudu, tedy součet výše uvedených složek.



Obr. 2: Průběh zkratového proudu

Moment synchronního stroje

Pro výpočet momentu stroje můžeme psát obecný vztah

$$M = 9,55 \cdot \frac{P}{n} \quad (\text{Nm})$$

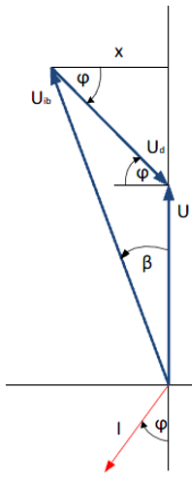
kde P – výkon stroje (W)
 n – počet otáček (min^{-1})

Pro synchronní stroj potom platí

$$M = 9,55 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi}{n_s} \quad (\text{Nm})$$

kde U – elektrické napětí (V)
 I – elektrický proud (A)
 φ – fázový posun (-)
 n_s – synchronní otáčky (min^{-1})

Protože jsou otáčky synchronního stroje konstantní (synchronní), **nelze jeho moment vyjádřit v závislosti na otáčkách**. Při změně zátěže se ovšem mění zátěžný úhel β . Pro synchronní stroje tedy vyjadřujeme závislost momentu M na zátěžném úhlu β .



Obr. 1: Fázorový diagram

Z výše uvedeného fázorového diagramu lze určit vzdálenost x jako

$$x = U_d \cdot \cos\varphi = U_{ib} \cdot \sin\beta$$

Dosažením za U_d dostáváme

$$x = x_d \cdot I \cdot \cos\varphi = U_{ib} \cdot \sin\beta$$

Následně vyjádříme

$$I \cdot \cos\varphi = \frac{U_{ib} \cdot \sin\beta}{x_d}$$

Dosažením do základního vzorce dostáváme

$$M = 9,55 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot U_{ib} \cdot \sin\beta}{X_d \cdot n_s}$$

Moment synchronních strojů je tedy:

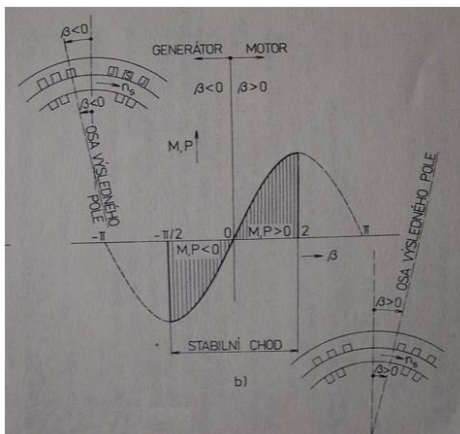
- přímo úměrný svorkovému napětí U
 - přímo úměrný U_{ib} , resp. budícím proudu I_b
 - přímo úměrný zátěžnému úhlu β
 - nepřímo úměrný synchronní reaktanci X_d , která souvisí s velikostí vzduchové mezery
- Zátěžný úhel β se mění v rozsahu

$$\beta = \left(-\frac{\pi}{2}, 0\right) \cup \left(0, \frac{\pi}{2}\right)$$

$\beta = \pm\pi/2$ je moment stroje maximální.

Průběh momentu stroje s hladkým rotorem

Dojde-li k překročení kritické meze dodávaného výkonu alternátoru, stroj vypadne ze synchronismu. To znamená, že se roztočí nad synchronní otáčky a ze sítě naopak začne odebírat zkratový proud.



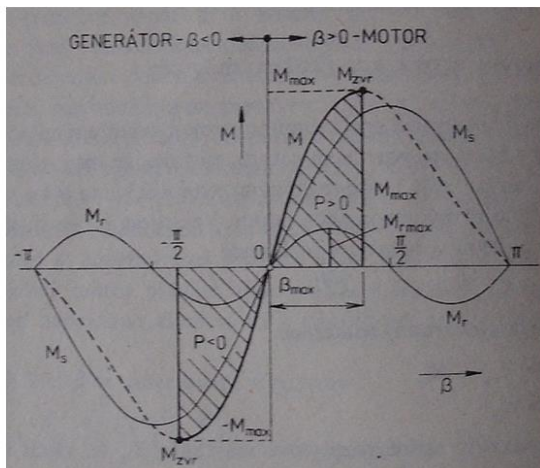
Obr. 2: Průběh momentu stroje s hladkým rotorem

Průběh momentu stroje s vyniklými póly

Moment má vlivem proměnné vzduchové mezery dvě složky:

- synchronní M_s - závisí na buzení a zátěžném úhlu
- reakční M_r - závisí na rozdílu $X_d - X_q$ a $\sin 2\beta$. Tato složka nezávisí na buzení.

U motoru je dosaženo maximálního momentu M_{max} při cca $\beta = 70^\circ$ až 80°



Obr. 3: Průběh momentu stroje s vyniklými póly

Řízení napětí

Velikost indukovaného napětí alternátoru lze vyjádřit $U_i = B \cdot l \cdot v$ (V)

kde B - indukce magnetického pole (T)
 l - délka vinutí (m)
 v - rychlost pohybu (m/s)

Alternátor musí dodávat stálé napětí při různém zatížení, tzn. výstupní napětí musí být konstantní. Při změnách proudu ve statoru se tak musí měnit budící proud rotoru a tím i magnetické pole rotoru.

Pokud tedy dojde k poklesu svorkového napětí, je nutné zvýšit budící proud, tzv. alternátor přibudit. Při nárůstu výstupního napětí je nutné naopak budící proud snížit, tedy alternátor odbudit.

Výstupní napětí alternátoru je také závislé na rychlosti otáčení rotoru. Při takovéto regulaci ovšem dochází ke změně kmitočtu indukovaného napětí. Při použití alternátoru v rozvodné síti je tedy tento způsob nevhodný.

Hlavními požadavky na budící soustavu jsou:

- udržování požadované hodnoty svorkového napětí
- provozní spolehlivost
- plynulá regulace
- rychlá odezva
- rychlé odbuzení

Budící soustava alternátoru

Budící soustava se skládá:

- systém zdroje buzení – umožňují plynulou regulaci, rychlá změna budícího napětí
- regulátor buzení – udržuje požadované výstupní napětí, zajišťuje stabilitu alternátoru
- odbuzovací systém

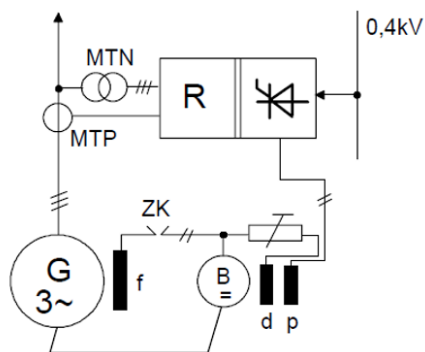
Budící systémy s rotačním budičem

Vhodné pro výkony do cca 150MW. Tento systém se skládá z rotačního budiče B, který je tvořen jako derivační buzení nastavené naprázdno. Regulátor R je napájen z rozvodny vlastní potřeby. Řízený usměrňovač napájí pomocné přídavné buzení. ZK představuje zhášecí komoru.

Všechny stroje jsou na společné hřídeli s alternátorem.

Volba konkrétního budiče potom závisí na výkonu:

- derivační dynamo – pro menší výkony
- dynamo s cizím buzením, které je buzeno derivačním dynamem

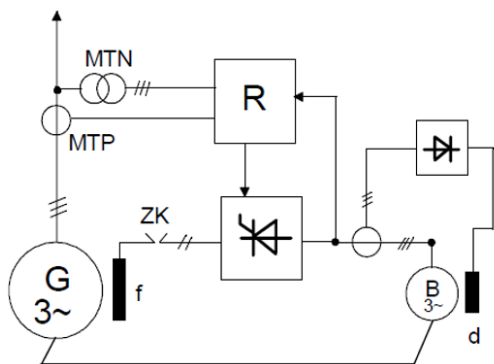


Obr. 1: Budící systém s rotačním budičem

Budící systémy s tyristory

Regulace napětí je řešena pomocí řízeného usměrňovače přes rotační střídavý budič nebo z vlastní spotřeby (rozběh).

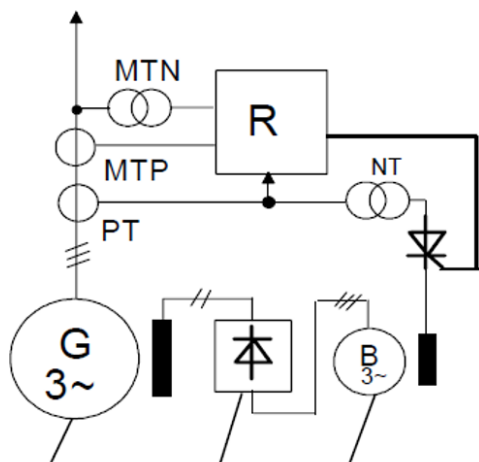
Z důvodu možného zkratu generátoru a provozní spolehlivosti jsou tyristory předimenzovány. Odbuzení lze provést přechodem v invertorový chod.



Obr. 2: Budící systém s tyristory

Statické systémy bezkartáčové

Tyristory jsou umístěny na hřídeli alternátoru. Budič je realizován jako pomocný alternátor s kotvou na rotoru. Jeho budící vinutí je napájeno z přípojnice vlastní spotřeby.



Obr. 3: Statický systém bezkartáčový

Provoz alternátoru a Samostatně pracující alternátor

Synchronní alternátor může pracovat ve dvou režimech:

- trvalé napájení samostatné zátěže – řešení jako záložní zdroj energie při výpadku rozvodné sítě (důležité např. v nemocnicích) nebo jako alternátor pro mobilní prostředky (např. na lodích nebo odlehlých oblastech)

- parametry alternátoru jsou upravovány podle požadavků rozvodné sítě

Alternátory jsou mechanicky spřaženy s hnací hřídelí turbíny nebo spalovacího motoru.

V případě, že alternátor pracuje samostatně, lze **regulovat** jeho otáčky a výstupní napětí.

Pokud dojde ke zvýšení zátěže, je nutné si uvědomit, že:

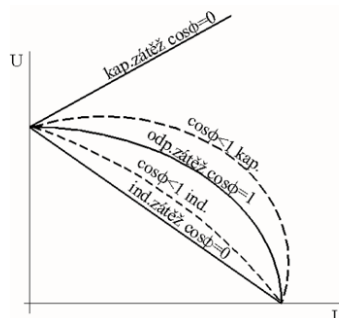
- poklesnou otáčky a tím i frekvence výstupního napětí. Pro zajištění synchronních otáček je tedy nutné použití regulátoru.

- větší zátěž také vede ke zvýšení úbytku napětí na alternátoru vlivem synchronní reaktance. Poklesne tak výstupní napětí. Pro jeho opětovné dorovnání na požadovanou hodnotu je nutné zvýšení budícího proudu. Využívá se přitom regulátor buzení.

Alternátor lze s ohledem na velkou synchronní reaktanci považovat za relativně měkký zdroj.

Změna napětí také závisí na charakteru zátěže i její velikosti. V případě kapacitní zátěže se stroj přibuzuje a napětí tedy stoupá. Opakem je induktivní zátěž, kdy se stroj odbuzuje a napětí klesá.

Na následujícím obrázku je zobrazen vliv chování alternátoru při různých typech zátěže.



Obr. 1: Vliv chování alternátoru při různých typech zátěže

Paralelně pracující alternátory

Pod pojmem **fázování** rozumíme připojení synchronního stroje na tvrdou síť bez proudových rázů. Alternátory lze na síť připojit několika způsoby:

- asynchronní fázování – v tomto případě se alternátor roztočí na otáčky blíží se synchronním. Posléze se připojí na síť a ihned se nabudí. Alternátor se „vtáhne do synchronismu“. Jedná se o rychlé připojení, které způsobuje velké momentové a proudové rázy. Používá se proto výjimečně, např. v havarijních stavech.
- přesné (synchronní) fázování – jedná se o časově náročné připojení, ovšem nevznikají zde velké momentové ani proudové rázy

Pro přesné fázování je nutné splnit tyto podmínky:

- stejný sled fází
- stejný kmitočet a napětí alternátoru i sítě
- nulový fázový posuv mezi napětím alternátoru a sítě

Synchronní stroj na tvrdé síti

Absolutně tvrdou síť rozumíme 3fázový systém s konstantním napětím a frekvencí.

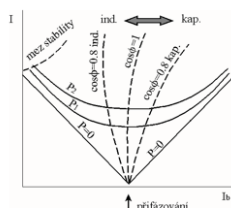
Při ideálním přifázování neprotéká mezi oběma stroji žádný vyrovnávací proud.

Na tvrdé síti lze stroj řídit budícím proudem a momentem na hřídeli tak, abychom dosáhli konstantního napětí a frekvence totožné se sítí.

Dojde-li po připojení stroje ke snížení budícího proudu I_b , sníží se napětí U_{ib} , což povede k průchodu vyrovnávacího proudu. Fázový posuv napětí U a proudu I je 90° - napětí se předbíhá před proudem. Protože se nepřenáší žádný činný výkon, stroj se chová jako indukčnost a odebírá ze sítě jalový výkon na dobuzení.

Jestliže stroj přebudíme, fázový posuv mezi napětím U a proudem I , bude opět 90° , ovšem proud předbíhá napětí. Stroj se tedy bude v síti chovat jako kapacita a do sítě bude jalový výkon dodávat.

Na následujícím obrázku je zobrazena závislost statorového proudu I na budícím proudu I_b , tzv. V-křivky.



Obr. 2: Závislost statorového proudu I na budícím proudu I_b

Synchronní motor Spouštění

Při spouštění synchronních motorů je nutné dosáhnout otáček blízkých synchronním.

Synchronní motory s vlastním spouštěním vyžadují frekvenční měniče, které jsou softwarově upraveny pro tento typ motorů. Nelze tedy použít klasický frekvenční měnič pro asynchronní motory. Při pohonu z frekvenčního měniče se frekvence zvyšuje ve vhodné době náběhu a rotor je synchronizován již od 0,7Hz. Otáčky motoru jsou potom přesně proporcionální frekvenci.

Existují také motory, které mohou být spouštěny pomocí startovacích vinutí, pomocí nichž se motor spouští, jako by měl zkratovaný klecový rotor.

Běžné způsoby spouštění:

- pomocným motorem, kdy se fází na síť stejně jako alternátor
- asynchronní rozběh využívá tlumič, přičemž se motor rozbíhá jako asynchronní motor. Budící vinutí je při rozběhu uzavřeno přes odpor. Po roztočení se stroj nabudí a synchronizuje.

Řízení otáček

Pro řízení otáček synchronních motorů se využívá změny frekvence.

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (\text{ot./min})$$

kde f – frekvence napětí (Hz)
 p – počet pólových dvojic (-)



Obr. 1: Synchronní motor

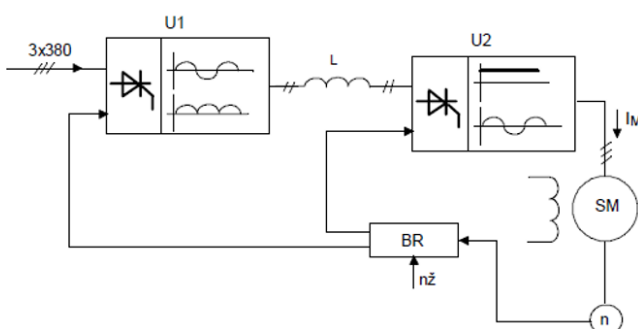
Synchronní motory DYNEO® LSRPM - parametry produktové řady jsou výkon 0,75 až 400 kW; točivý moment 1 až 1400 Nm; otáčky 1 až 5500 ot/min a výška hřídele 90 až 315 mm.

Nepřímý měnič frekvence se stejnosměrným meziobvodem

Z blokového schématu níže je patrné využití řízených polovodičových prvků – tyristorů. Blok U1 představuje tyristorový usměrňovač, U2 potom střídač. Blok řízení BR slouží ke generování impulsů, jimiž se řídí velikost stejnosměrného proudu na řídicí elektrody střídače, což má za následek změnu frekvence proudu do motoru I_M .

Pro plnohodnotnou regulaci je nutné využít snímače otáček a polohy rotoru. Požadované otáčky motoru jsou zadávány hodnotou $n\dot{z}$.

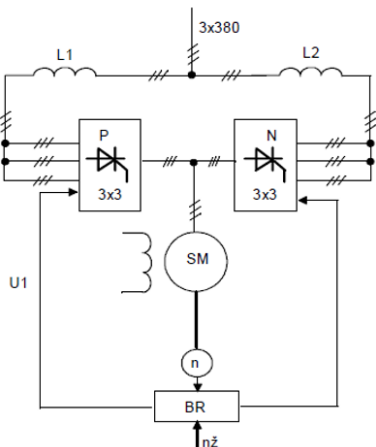
L představuje tlumivku stejnosměrného meziobvodu.



Obr. 2: Nepřímý měnič frekvence se stejnosměrným meziobvodem

Přímý měnič frekvence se skrytým stejnosměrným meziobvodem

Bloky P a N představují trojfázové usměrňovače, přičemž každý blok je složen ze tří skupin. Celkem je zde tedy 18 tyristorů, které umožňují spojení libovolné fáze s libovolnou fází motoru. Blok řízení stejně jako v předešlém případě generuje impulsy. V tomto provedení se otevírají skupiny tyristorů v závislosti na fázi sítě a žádané frekvenci proudu motoru.



Obr. 3: Přímý měnič frekvence se skrytým stejnosměrným meziobvodem

Využití

V běžných aplikacích se nejčastěji setkáme se synchronními motory s permanentními magnety, a to při výkonech od stovek wattů do desítek kilowattů.

Synchronní motory se v současné době využívají především v dopravní technice, a to jako trakční motory pro kolejová i nekolejová vozidla. Plní zde náhradu za asynchronní i stejnosměrné motory.

Se synchronními pohony se také setkáme v automobilové technice, kde se využívají místo stejnosměrných motorů s permanentními magnety. Výkony se zde pohybují od desítek wattů po jednotky kilowattů.



Obr. 4: Trakční motor HPM-5000L 2-7 kW/ 48V - vodou chlazený

Provedení synchronních strojů

Turboalternátory

Jedná se o stroje s hladkými rotory poháněné parní turbínou. Jsou konstruované na poměrně vysoké otáčky až 3000 ot./min., jimž je přizpůsobena konstrukce rotoru. S ohledem na velké působící odstředivé síly se rotory nevyrábí o větším průměru než 1,2m. Protože se však výkon odvíjí od objemu stroje ve vzduchové mezeře mezi rotorem a statorem, mají rotory velkou osovou délku.

Rotor je výkovek z oceli s drážkami pro uložení vinutí. Toto vinutí je z budiče napájeno přes sběrací kroužky.



Obr. 1: Turboalternátor

Hydroalternátory

Na rozdíl od turboalternátorů se jedná o pomaloběžné stroje. Pomalé otáčky dovolují konstruovat rotory s velkými průměry a malou osovou délkou. Rotor je proveden s vyniklými póly.

Využití nachází především ve vodních elektrárnách.



Obr. 2: Hydroalternátor

Komutátorové stroje

V tomto výukovém modulu se seznámíme s konstrukcí a principem činnosti střídavých komutátorových strojů. Podrobně se zaměříme na nejběžnější typ jednofázových střídavých motorů, využívaných v domácích spotřebičích. Představíme si také dvě provedení trojfázových motorů - Winterův-Eichbergův motor a Schrageho motor.

Princip činnosti

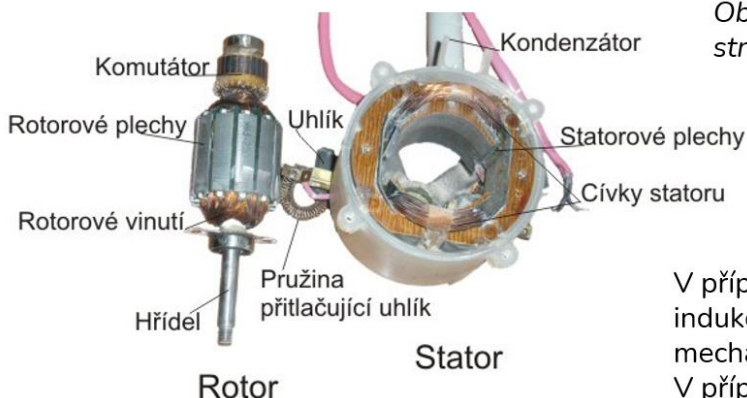
Mezi komutátorové stroje řadíme dynama a motory. Motory mohou být stejnosměrné nebo umožňují připojení na jednofázovou nebo třífázovou střídavou síť. Jednofázové motorky jsou přitom nejrozšířenějším druhem pohonů, se kterými se setkáváme v domácích spotřebičích, jako je vysavač, mixér apod.

Komutátorové střídavé motory tedy rozdělujeme na:

- 1fázové sériové
- 1fázové repulsní
- 3fázové derivační
 - s napájeným statorem (Winterův-Eichbergův motor)
 - s napájeným rotorem (Schrageho motor)

Komutátorový střídavý stroj

Komutátor je váleček tvořený z několika vzájemně izolovaných lamel ze slitiny mědi, ke kterým jsou připojeny jednotlivé vývody cívek rotoru (kotvy). Pro elektrické spojení s rotující částí slouží tzv. kartáče tvořené uhlíky, které jsou na tyto lamely přitlačovány pružinami.



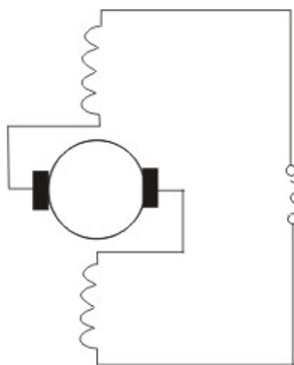
Obr. 1: Stator a rotor střídavého komutátorového stroje

V případě dynama komutátor usměrňuje střídavé indukované napětí v cívkách kotvy. Plní tedy funkci mechanického usměrňovače.
V případě motoru komutátor plní funkci střídače, což způsobuje změnu proudu ve vodičích kotvy.

Princip činnosti

Princip činnosti si nyní vysvětlíme na nejčastějším provedení střídavých komutátorových motorů, a to na motoru sériovém, také zvaném univerzální, který můžeme napájet jak stejnosměrným, tak i střídavým proudem.

Schéma zapojení sériového motorku je zobrazeno na následujícím obrázku.

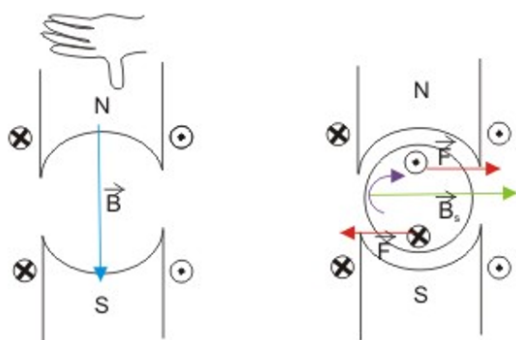


Obr. 2: Schéma zapojení sériového motorku

Statorovým vinutím protéká proud, který vytvoří magnetické pole, jehož orientaci lze určit Ampérovým pravidlem pravé ruky. Rotorovým vinutím protéká také proud. Vytvořené magnetické pole způsobí natočení rotoru tak, aby jeho jižní pól směřoval k severnímu pólu a naopak jeho severní pól k jižnímu. Aby se rotor začal kontinuálně otáčet, je tedy nutné změnit směr proudu v rotoru. K tomu účelu slouží právě komutátor.

Statorovým vinutím protéká proud, který vytvoří magnetické pole, jehož orientaci lze určit Ampérovým pravidlem pravé ruky.

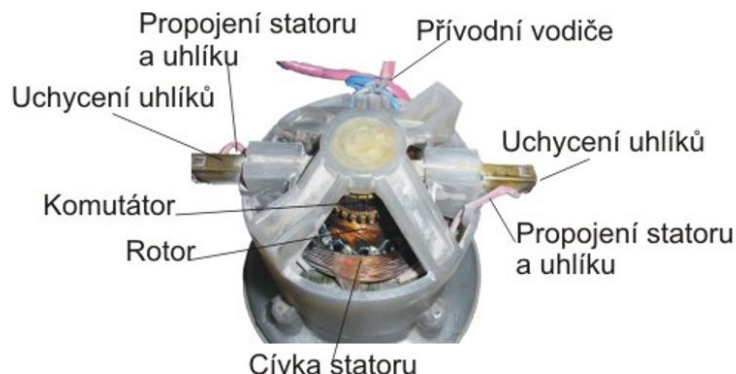
Rotorovým vinutím protéká také proud. Vytvořené magnetické pole způsobí natočení rotoru tak, aby jeho jižní pól směřoval k severnímu pólu a naopak jeho severní pól k jižnímu. Aby se rotor začal kontinuálně otáčet, je tedy nutné změnit směr proudu v rotoru. K tomu účelu slouží právě komutátor.



Obr. 3: Působení magnetické indukce a směr sil

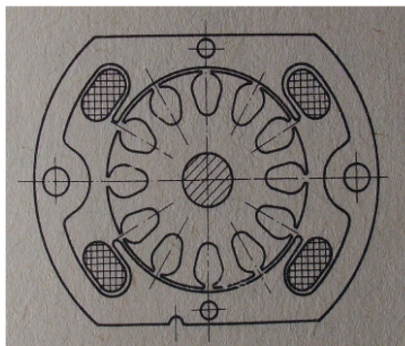
Jednofázové komutátorové motory

S jednofázovými sériovými motorky se běžně setkáváme v domácích spotřebičích, jako je mixér, vysavač, ventilátor apod. Své uplatnění také našly v ručním elektrickém nářadí.



Obr. 1: Skladba jednofázového komutátorového motoru

Konstrukčně je rotor řešen jako stejnosměrná kotva s komutátorem. Stator má v případě malých motorů vyjádřené póly. Větší stroje mají vinutí uloženo ve statorových drážkách. Stator je poskládán z dynamových plechů pro snížení ztrát vířivými proudy.



Obr. 2: Konstrukce rotoru



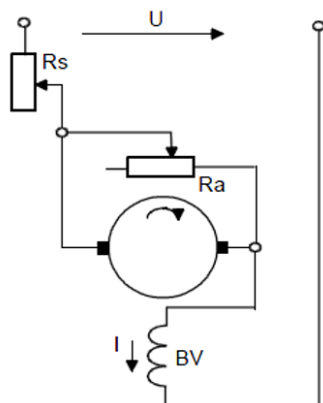
Obr. 3: Sériové zapojení cívky statoru a rotoru

Nevýhodou u těchto motorků je vznik rušení a jiskření na komutátoru. Odrušení je realizováno připojením kondenzátorů.

Vinutí statoru a rotoru jsou zapojena do série. U malých dvupólových motorů se kotva zapojuje mezi dvě cívky statoru za účelem snížení nežádoucího rušení.

Otáčky lze řídit velmi jednoduše změnou napájecího napětí. Otáčky klesají se čtvercem napětí. V současné době se využívají elektronické regulátory. Základem jsou polovodičové výkonové prvky, jako je tyristor nebo triak.

U starších konstrukcí se pro řízení používal prostý rezistor, zařazený do série nebo paralelně k motoru.



Obr. 4: Regulace otáček pomocí rezistoru

Výkon při napájení stejnosměrným proudem je dán vztahem:

$$P_1 = U \cdot I$$

Při napájení střídavým proudem je potom:

$$P_2 = U \cdot I \cdot \cos\phi$$

Pro moment potom platí:

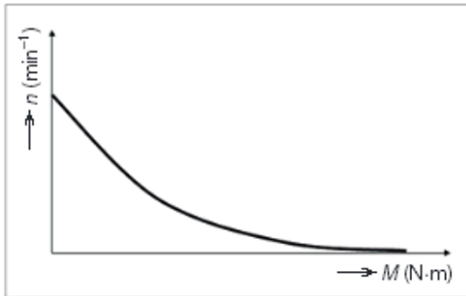
Porovnáním momentů M_1 a M_2 získáme:

$$M_1 = \frac{60 \cdot U \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot n_1} \quad M_2 = \frac{60 \cdot U \cdot I \cdot \cos\phi}{2 \cdot \pi \cdot n_2}$$

$$n_2 = n_1 \cdot \cos\phi$$

Motor má tedy při stejném momentu M_1 a M_2 větší otáčky při napájení stejnosměrným proudem než při napájení proudem střídavým.

Momentová charakteristika sériového motoru je znázorněna na obrázku níže.



Obr. 5: Momentová charakteristika sériového motoru

Trojfázové komutátorové motory

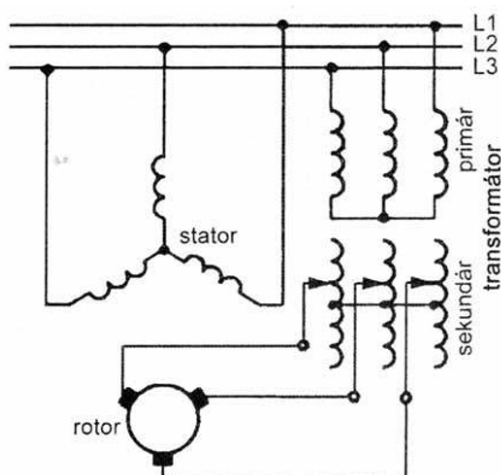
Trojfázové komutátorové motory jsou nejčastěji v provedení jako derivační a to z důvodu tvrdé zatěžovací charakteristiky.

Podle provedení rozeznáváme:

- motory s napájeným statorem - Winterův-Eichbergův motor
- motory s napájeným rotorem - Schrageho motor

Winterův-Eichbergův motor

Stator je zapojen přímo na síť. V rotoru se indukuje napětí vlivem magnetického pole statoru. Rotor je také napájen přes regulační transformátor nebo indukční regulátor.



Obr. 1: Winterův-Eichbergův motor

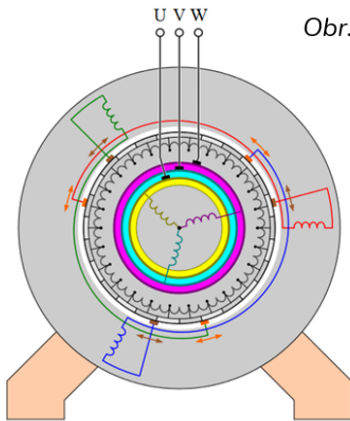
Pro regulaci napětí je používán kladkový trojfázový transformátor, po jehož sekundárním vinutí se odvalují uhlíkové kladky.

Pro změnu směru otáčení je využit uzel vyvedený ze středu vinutí, jímž se obrátí fáze regulačního napětí. Regulace je v tomto případě zcela plynulá a hospodárná (nevznikají ztráty v rezistorech).

Schrageho motor

U tohoto motoru na každou pólovou dvojici na komutátoru dosedají tři dvojice kartáčů. Trojfázové vinutí rotoru je spojeno do trojúhelníku a napájené přes kroužky. Rotor také obsahuje regulační vinutí vyvedené na komutátor.

Stator je tvořen trojfázovým (sekundárním) vinutím.



Obr. 2: Schrageho motor

Výhodou Schrageho motoru oproti Winter-Eichbergova motoru je to, že nepotřebuje dodatečný zdroj regulačního napětí.

Naproti tomu Winter-Eichbergův motor dosahuje větších výkonů.

Speciální stroje

V prvním modulu je vysvětlen princip lineárního motoru a uvedeny příklady jeho použití. Tento moderní pohonný systém se stále více uplatňuje v průmyslové praxi a má zajímavou perspektivu v dopravě.

Druhý modul se zabývá indukčním generátorem a indukčním ohřevem, který si od metalurgických závodů přes maloobjemové tavicí pece – např. ve stomatologii razí cestu do běžných domácností jako moderní způsob ohřevu a vaření potravin.

Třetí modul se letmo zmiňuje o principech a použití selsynů, jejichž význam je dnes spíše historický a jsou nahrazeny modernějšími a přesnějšími výrobky.

Poslední modul je věnován krokovým motorům, které tvoří významnou část průmyslových přesných polohovacích pohonů.

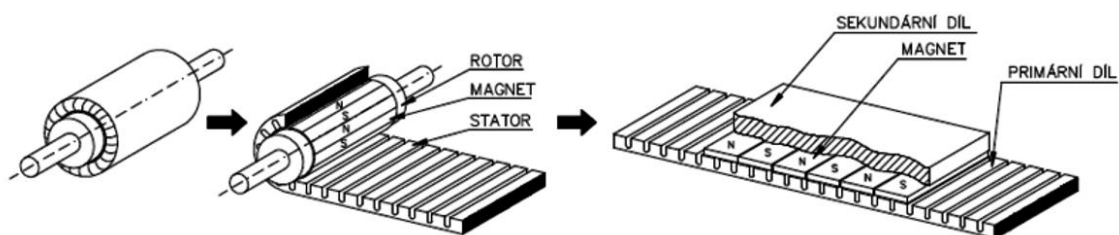
Lineární motory

Mnoho technických aplikací vyžaduje pohyb v rovině. Klasické řešení takového pohybu je využití točivých strojů s převodovkou a systémem, který převádí točivý pohyb na přímočarý (např. šroubová tyč s matkou).

Tyto systémy jsou velké, nákladné a postupem času se snižuje jejich přesnost. U některých řešení může být zajímavé použití lineárního motoru. Lineární motory se vyznačují dlouhodobou stabilitou parametrů, vyšší přesností a dynamikou a umožňují navrhovat netradiční řešení. Nevýhodou tohoto řešení je ale vyšší cena.

V **principu** je lineární motor podobný motoru točivému, pokud rozvineme kruhový stator do plochy a necháme rotor pohybovat se vůči statoru.

Obr. 1: Princip



Lineární motory mohou být:

- asynchronní
- synchronní
- Krokové

Výhody lineárních motorů oproti nepřímým lineárním pohonům

- možnost použití více nezávislých jezdců na jednom statoru
- možnost pohybu rotoru ve dvou osách
- rychlost posuvu
- přesné polohování
- opakovatelnost
- dynamika
- délka pohybu

Nevýhody lineárních motorů:

- nelze si pomoci převodem menší síla
- cena
- přívod elektrické energie (případně chlazení) do jezdců – musí být dostatečně flexibilní a chráněn před mechanickým poškozením

•konstrukční řešení – stator x jezdec

U lineárních motorů sledujeme jiné parametry.

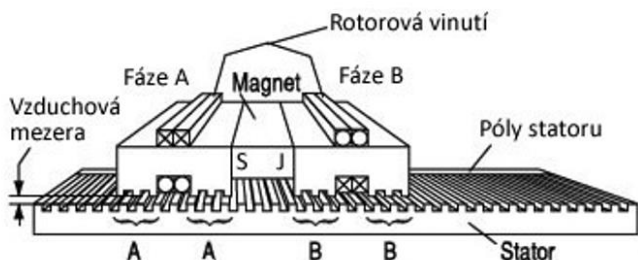
- moment -> síla
- otáčky -> rychlost

Parametry lineárních motorů

- síla 50 až 16000 N
- rychlost 0,01 mm.s⁻¹ až 15 m.s⁻¹
- polohování s přesností 5 μm
- dostupné provedení s integrovaným vodním chladičem a vyšší trvalou silou

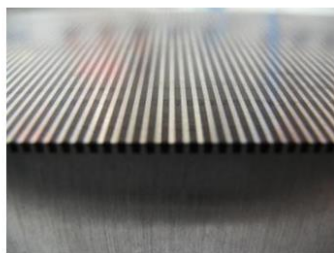
Krokové lineární motory

Používají se k polohování lehkých těles. Vyrábějí se zpravidla jako dvoufázové a třífázové.



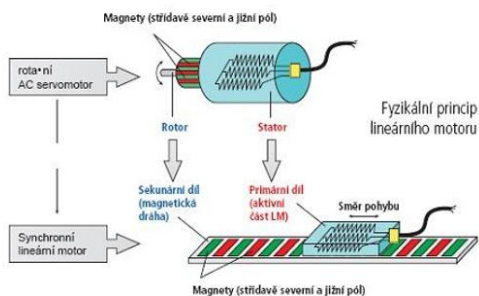
Obr. 2: Krokový lineární motor

Jinak se princip těchto motorů a jejich ovládání neliší od klasických točivých krokových motorů. Z hlediska konstrukce je třeba vyřešit pohyblivý přívod napájecího napětí a vedení pohyblivé části.



Obr. 3: Detail statoru s permanentními magnety

Synchronní lineární motory

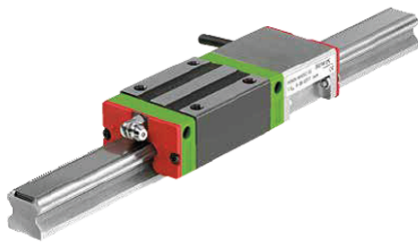


Obr. 4: Stator (primár) – trojfázové vinutí, rotor (sekundár) – páska z PM ze vzácných zemin (Nd-Fe-B)

Statorem je u lineárních motorů označován primární díl a rotorem sekundární díl. Primární část je tvořena stejně jako u klasických strojů feromagnetickým svazkem složeným z elektrotechnických plechů a trojfázového vinutí uloženého v jeho drážkách. Proti primárnímu dílu je konstrukčně uspořádána sekundární část tvořená permanentními magnety, které jsou nalepené na ocelové podložce.

Pokud přivedeme do primární části (jezdec) řídicí proud, vznikne magnetické pole mezi oběma částmi a dojde k pohybu jezdce. Úroveň proudu pak můžeme ovládat rychlost pohybu. Téměř výhradně se pro řízení používají číslicové regulátory s kaskádovým uspořádáním tří zpětných vazeb: vnitřní proudové, střední rychlostní a vnější polohové. Někdy bývá i do obvodu zařazena smyčka regulace zrychlení. Sekundární díl tvoří ve většině uspořádání delší část stroje (magnetická dráha), kterou lze sestavovat do určitých délek. O části, která se má pohybovat, rozhoduje konstrukční uspořádání.

V naprosté většině konstrukcí se pohybuje primární část (jezdec) po dráze tvořené libovolným počtem sekundárních dílů. Sekundární díly se zpravidla vyrábí v segmentech o délkách od 192 do 512 mm. Nevýhodou tohoto uspořádání je, že k pohybující se části musí být přiveden napájecí kabel, kabel snímače polohy a případně přívod chladicí kapaliny. Vše pak musí být umístěno ve vlečném řetězci, který chrání kabely před poškozením a zajišťuje plynulý pohyb s jezdce.



Obr. 5: Lineární vedení

Tubulární synchronní lineární motory

Tubulární provedení lineárního motoru získáme stočením plochého motoru kolem osy rovnoběžné se směrem pohybu motoru. Tubulární motor může být vyroben jednostranný i oboustranný a může mít různé průřezy (kruhový, čtvercový, obdélníkový).

Asynchronní lineární motory

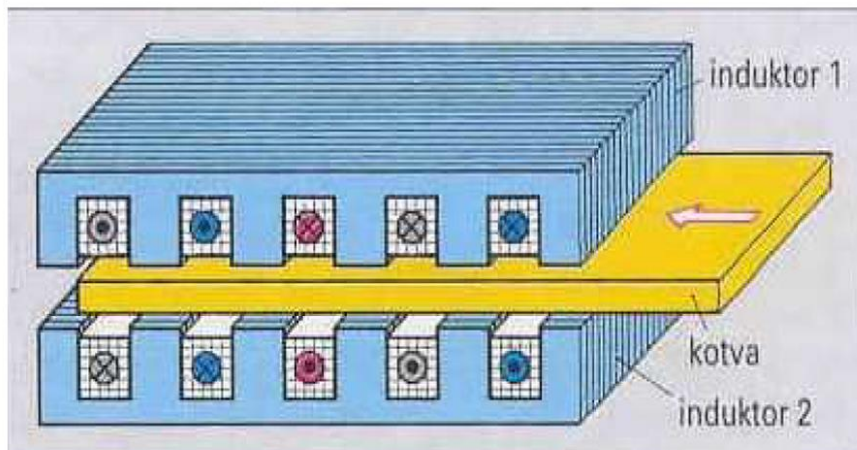
Asynchronní lineární motory pracují na principu asynchronního stroje:

- primární část - trojfázové vinutí
- sekundární vinutí
- klecové vinutí uložené do drážek
- hliníkový pás připevněný na ocelové podložce

Jsou jednostranné nebo oboustranné (vinutí je umístěno po obou stranách sekundární části vyrovnání radiálních sil).

Podle rozmístění cívek primární části:

- motory s podélným tokem – indukční čáry toku jsou rovnoběžné ke směru pohybu (tažné síly)
- motory s příčným tokem – indukční čáry toku jsou kolmé ke směru pohybu (tažné síly), nižší magnetizační proud, ale menší tahová síla



Obr. 6: Asynchronní lineární motor

Postupné pole indukuje podle *Lenzova zákona* v kotvě vířivé proudy, jejichž směr je takový, že jejich pole působí proti postupnému poli a vzniklá síla je zdrojem pohybu

Magnetická levitace – MAGLEV

Maglev – zkráceně z magnetické levitace – je nejmodernější, nejrychlejší, ale nejdražší druh kolejové dopravy. Vlak se pohybuje na polštáři magnetického pole, které je vytvářeno soustavou supravodivých magnetů, zabudovaných v trati i ve vlaku. Tento vlak má tedy místo kol speciální systém magnetů, včetně lineárních motorů a pohybuje se několik centimetrů nad kolejnicí.

V Evropě se používá vzdálenost okolo pěti centimetrů, v Japonsku kvůli geologické aktivitě okolo 10 cm. Trati pro Maglev jsou poměrně nákladné a musejí být z bezpečnostních důvodů stavěny na mostech nebo v tunelech, což rozvoj této technologie také prodražuje.

Rychlost vlaků není teoreticky téměř nijak omezená, rychlostní rekord, který vytvořili Japonci (2005), je 581 km/h. V praxi je rychlost limitovaná spotřebou energie a aerodynamickým odporem, tento problém se snažil vyřešit projekt Swissmetro tím, že navrhuje provozovat dráhu v tunelech zbavených vzduchu až ke hranici vakua (vactrain).

Takové řešení bylo navrženo i pro tzv. transatlantický tunel.

V pravidelném provozu je Maglev jako příměstská dráha na letišti v Šanghaji. V Japonsku plánují zprovoznit roku 2027 dráhu Tokio - Nagoja připravenou na prodloužení do Ósaky. Zajímavé video najdete tady.

Obr. 7: MAGLEV



Využití lineárních motorů:

- obráběcí stroje
- stroje pro výrobu a osazování plošných spojů
- speciální stroje
- zdravotnická technika
- doprava

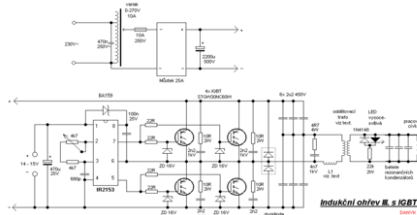
Indukční generátor

Indukční generátor slouží jako zdroj elektromagnetické energie pro indukční ohřev vodivého materiálu. Předmět z vodivého materiálu – nejčastěji kovu – je umístěn do střídavého elektromagnetického pole cívky, která je buzena výkonovým elektronickým generátorem.

V kovovém materiálu se indukují vířivé proudy, jejichž působením dochází k ohřevu. Větší předměty se ohřívají prostřednictvím pole o nižších kmitočtech, pro ohřev menších a tenkostěnných předmětů se využívají vyšší kmitočty. Používané kmitočty leží v rozsahu od 50Hz do desítek až stovek kHz.

Budící generátor vysílací cívky je tak v podstatě výkonný dlouhovlnný až středovlnný vysílač. Z toho vyplývá, že generátor může být velmi výkonným zdrojem rušení a při jeho konstrukci je nutno přísně dodržovat normy a zásady elektromagnetické slučitelnosti.

Výhodou použití indukčních generátorů pro ohřev je vyšší účinnost a rovnoměrnost přenosu energie a ohřev pouze vodivých předmětů.



Možnosti využití

- *Ruční přístroje pro ohřev menších předmětů* – výkon stovky W až jednotky kW.
- *Indukční pec* – výkon jednotky až stovky kW. Využívají se v metalurgii pro tavbu kovů, menší pece slouží k tavbě drahých kovů (využití ve stomatologii) apod.
- *Indukční vařiče a sporáky* – výkon stovky W až jednotky kW.



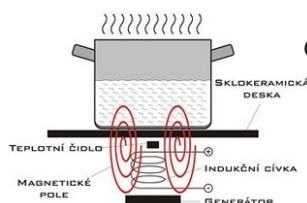
Obr. 2: Indukční tavicí pec

Princip indukčního vaříče

Plotýnka (varná zóna) vaříče obsahuje cívku, která je napájena velkým střídavým elektrickým proudem. Cívka je z měděného drátu, což je velmi dobrý elektrický vodič a nedochází v něm k velkým ztrátám. Cívka je buzena elektronickým generátorem a vzniká magnetické pole, které vytváří teplo dvěma různými způsoby:

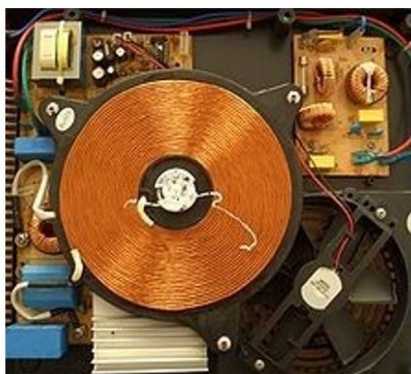
- Působením magnetického pole na elektricky vodivé dno nádoby se v nádobě indukují vířivé proudy, které se díky elektrickému odporu nádoby mění na teplo.
- Menší část tepla lze také získat ze ztrát působených hysterezí feromagnetického materiálu nádoby při jeho magnetizaci. Vzniká tak ale méně než 10% celkového tepla.

Od ohřáté nádoby se později ohřeje i její obsah.



Obr. 3: Princip indukčního vaříče

Cívka generující indukční tok má mnoho závitů, kdežto spodek hrnce je ve své podstatě jediný zkratovaný závit. Soustava cívka-hrniec funguje jako transformátor, který sníží napětí a zvýší proud procházející materiálem hrnce. Ostatně celý přenos elektrické energie z cívky do elektricky vodivé nádoby a vznik tepla je podobný nežádoucím ztrátám v transformátoru.



Obr. 4: Indukční vaříč zevnitř

Většina indukčních vaříčů používaných v praxi je navržena pro nádoby z feromagnetického materiálu. Principiálně je možné zkonstruovat indukční vaříč fungující s jakýmkoli elektricky vodivým, a dokonce i nemagnetickým (například hliníkovým či měděným) nádobím.

Ocel a železo ale mají mnohem vyšší permeabilitu. Vysoká permeabilita materiálu nádoby v kombinaci s frekvencí, kterou jsou napájeny cívky, umožňují nastavit hloubku vniku magnetického pole do dna nádoby. Uplatňuje se zde takzvaný skin efekt.

Vířivé proudy se mohou ve feromagnetickém materiálu nádoby uzavírat a díky vysokému elektrickému odporu železa (vyšší odpor je v tomto případě výhodný) materiál hrnce zahřívají. Indukční vaříč nemůže fungovat s elektricky nevodivým nádobím (např. sklo nebo keramika).



Obr. 5: Pohled na indukční vaříč ze strany

Indukční sporáky jsou rychlejší a energeticky efektivnější než tradiční elektrické sporáky, navíc umožňují přesnou regulaci výkonu plotýnky podobně jako plynové vařiče. Pro povrch vařiče bývá použit materiál se špatnou tepelnou vodivostí. Na rozdíl od tradičních sporáků je ohřívána přímo nádoba (nikoliv okolí), což snižuje možnost popálení. Nejvyšší teplotu při indukčním vaření má obvykle nádoba, nikoliv rozžhavená plotýnka jako u elektrického ohřevu nebo plamen plynového hořáku.

Díky tomu, že teplo je generováno indukovaným elektrickým proudem, může vařič rozpoznat, že nádoba byla odstraněna nebo její obsah vyvřel, neboť taková událost se projeví změnou proudu a napětí cívky vařiče. Je tak možné realizovat funkce jako udržování teploty varu a automatické vypnutí při odstranění nádoby.

Výhody

- Indukční ohřev poskytuje řadu výhod ve srovnání s ohřevem plynem či vařiči s odporovou spirálou. Mezi výhody lze zařadit velmi rychlý ohřev, lepší účinnost přenosu tepla, rovnoměrnost ohřevu a lepší kontrolu ohřevu. V situacích, kdy není možné použít standardního ohřevu, je indukční ohřev naprosto ideální, neboť sám o sobě negeneruje vůbec žádné teplo.
- Doba, za kterou je možné uvést hrnec vody do varu, je závislá na výkonu vařiče a množství vody. Indukční vařič o výkonu 3600 W uvede hrnec vody do varu během tří minut, kdežto vařič o výkonu 1200 W bude na stejné množství vody potřebovat deset minut. Výkonnost indukčního vařiče se projeví například při smažení na tenké pánvi. Na této se několik lžiček oleje ohřeje na smažící teplotu za pouhých deset sekund.
- Indukční vařiče se také mnohem snadněji čistí, neboť jejich povrch je plochý a hladký nezávisle na tom, kolik indukčních zón je do něj vestavěno.

Nevýhody

- Indukční vařiče mají také své nevýhody. Jedna z největších nevýhod je nutnost použití nádob vyrobeného z magnetických materiálů. Přitom nádoby vyrobené z mědi či hliníku má mnohem lepší tepelné vlastnosti než nádoby vyrobené z oceli či železa. Díky lepší tepelné vodivosti dochází k lepší a rovnoměrnější distribuci tepla. Také nádoby vyrobené z nerezavějící oceli nemusejí být vždy vhodné. Často se doporučuje použití nádob se sendvičovým dnem. Ty mají dno tvořené vrstvami nerezové oceli, mezi které je vložena deska z běžné, feromagnetické oceli.
- Indukční vařiče fungují nejlépe s nádobím s plochým dnem. Pánve s kulatým dnem (wok) nebudou fungovat správně na plochem vařiči. Proto už se vyrábí indukční vařiče s prohlubní pro wok pánve.
- Pro lidi se srdečními stimulatory a defibrilatory může indukční vařič znamenat nebezpečí - velké indukční proudy mohou ohrozit jakoukoliv elektroniku. Existuje riziko ohřátí různých kovových řetízku, náramků či prstenů.
- Indukční vařiče jsou dražší než standardní vařiče s odporovou spirálou.
- Indukční vařiče jsou hlučné. Hluk vzniká vinou ventilátoru chladicímu elektroniku a dále pak brněním cívky.

Ekonomika provozu a dopady na životní prostředí

Podle amerického Úřadu pro energii je účinnost přenosu energie u indukčního ohřevu 90 %. U neindukčního ohřevu s plochým povrchem je účinnost přenosu 71 %. To znamená přibližně 20 % úsporu energie pro stejné množství přenesené energie.

Pro vyhodnocení dopadů na životní prostředí je třeba uvážit celý cyklus, který začíná již výrobou elektrické energie. Pokud se vezme v úvahu celková účinnost počínaje výrobou elektrické energie, jejího přenosu a finálně její přeměny na teplo, tak účinnost indukčního vařiče je srovnatelná s vařením na plynu. Účinnost výroby elektrické energie vyrobené z plynu či uhlí se pohybuje kolem 33 % (v současné době se takto vyrábí kolem 80% elektrické energie).

Ztráty během přenosu energie se pohybují kolem 5 %, což dává celkovou účinnost kolem 28 % . Vaření na plynovém vařiči má účinnost kolem 33 % a ztráty přenosu tepla do jídla se pohybují kolem 6 %, což dává celkovou účinnost 27,9 %. Máme-li spočítat jednotlivé účinnosti jedná se o součin účinnosti elektrárny, účinnost přenosu a účinnost instalovaných elektrických zařízení.

Př:

Účinnost indukčního ohřevu: $\eta_1 = \eta_v * \eta_s * \eta_{sp1} = 0,33 * 0,95 * 0,90 = 0,282$ převod na procenta 28,2%

Účinnost infa ohřevu: $\eta_2 = \eta_v * \eta_s * \eta_{sp2} = 0,33 * 0,95 * 0,6 = 0,188$ převod na procenta 18,8%

kde $\eta_1 \eta_2$ účinnosti jednotlivých ohřevů

η_v účinnost elektrárny

η_s účinnost přenosu

$\eta_{sp1} \eta_{sp2}$ účinnost jednotlivých spotřebičů

Technologie	Účinnost	Čas potřebný k ohřátí 1,9 litru vody	Energie potřebná k přivedení 2 litrů vody do varu (z 20 °C)
Indukční vařič	83 až 90 %	4 minuty 46 sekund	745 kJ
Infra vařič	60 %	9 minut 0 sekund	1120 kJ
Topná spirála či litinový vařič	45 %	8 minut 0 sekund	1490 kJ
Plyn	55 %	6 minut 2 sekund	1220 kJ

Poznámka: V tabulce je brána v úvahu pouze účinnost samotného vařiče. Nebere v úvahu účinnost výroby a přenosu distribuční soustavy plynu a elektriny.

Selsyn - selfsynchron

Selsynu se také někdy říká elektrická hřídel. Umožňuje přenášet informaci o natočení hřídele vysílače po elektrických vodičích na přijímač, jehož osa kopíruje pohyb osy vysílače.

Selsyny byly poprvé použity pro ovládání vrat plavebních komor při výstavbě panamského průplavu. Později se rozšířily jako komunikační prostředky na lodích, na válečných lodích byly použity pro řízení palby z lodních děl. Později našly uplatnění v letecké technice, v radiotechnice a radiolokační technice při natáčení směrových antén atd. [1], [2] V současné době jsou nahrazeny optickými snímači polohy, které spolu s digitálním řízením nabízí daleko větší přesnost a užitnou hodnotu.

Princip

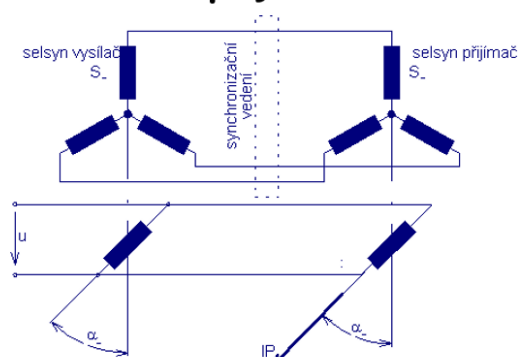
Jedná se v podstatě o střídavý indukční stroj skládající se ze statoru se souměrným třífázovým vinutím a jednofázového rotoru, který je napájen střídavým napětím. Pro vyhodnocení úhlové odchylky se používá zapojení na obr. 1. Selsyn S_1 slouží jako snímač polohy, selsyn S_2 jako indikátor polohy.

Poloha je zobrazena pomocí indikačního přístroje IP, ručka IP je spojena s rotorem selsynu S_2 . Stator selsynu S_1 a S_2 jsou vzájemně propojeny stejně jako rotory. Jsou-li tedy rotory vysílače a přijímače natočeny souhlasně ($\alpha_1 = \alpha_2$), neprotéká synchronizačním vedením žádný proud.

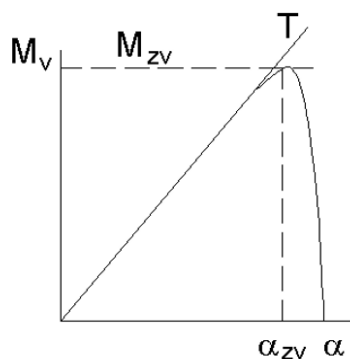
Pootočí-li se rotorem selsynu S_1 , jsou napětí indukovaná ve vinutí obou statorů různá a začne procházet proud. Proud vyvolá magnetický tok, v jehož důsledku se rotor selsynu S_2 natočí tak, aby synchronizačním vedením neprotékal žádný proud ($\alpha_1 = \alpha_2$). Rotor selsynu S_2 sleduje rotor selsynu S_1 s chybou, která je dána zatěžovacím momentem hřídele selsynu S_2 , pasivními odpory a rychlostí změn úhlu. Závislost chybového momentu na úhlu natočení je na obr. 2.

Výhodou snímače je schopnost přenášet úhlové výchylky i při rovnoměrném otáčení. Na jeden vysílač lze připojit více přijímačů a informaci současně přenášet na více míst. Rozlišovací schopnost selsynu se pohybuje v rozmezí 3 ÷ 10 úhlových minut. Z tohoto důvodu bylo používání selsynů v praxi vytlačeno daleko přesnějšími a modernějšími digitálními snímači.

Schéma zapojení



Obr. 1: Princip selsynu



Obr. 2: Závislost momentu selsynu na úhlu vzájemného natočení

Příklady selsynů



Obr. 3: Selsyn 110V



Obr. 4: Selsyn 5V, 400Hz



Obr. 5: Selsyn 55V, 50Hz

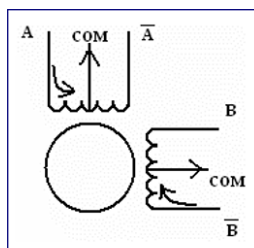
Krokový motor

Krokový motor (*Stepper Motor*, *Schrittmotor*) je indukční synchronní točivý stroj. Magnetické pole, které slouží k otáčení rotoru, je generováno postupným zapínáním napájení jednotlivých cívek – elektromagnetů – příslušných pólových dvojic statoru. Pólové nastavce rotoru a statoru jsou vzájemně posunuty, takže při vyvolání magnetického pole ve statoru se rotor pootočí právě o rozdíl vzdálenosti (úhlu) mezi příslušnými pólovými nastavci statoru a rotoru. Rotor se tedy pohybuje po krocích, jejichž velikost (úhel natočení) je dána konstrukcí motoru a způsobem generování řídicích impulsů. Krokový motor umožňuje velmi přesné polohování. Lze ho označit jako **digitální motor**.

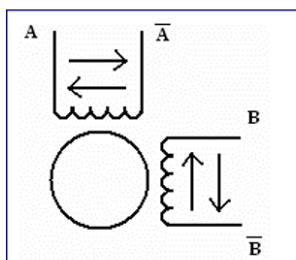
Krokové motory rozlišujeme:

•Podle způsobu vinutí na:

- **Unipolární** – proud může téci cívkou pouze jedním směrem.
- **Bipolární** – proud může téci cívkou oběma směry.



Obr. 1: Unipolární krokový motor



Obr. 2: Bipolární krokový motor

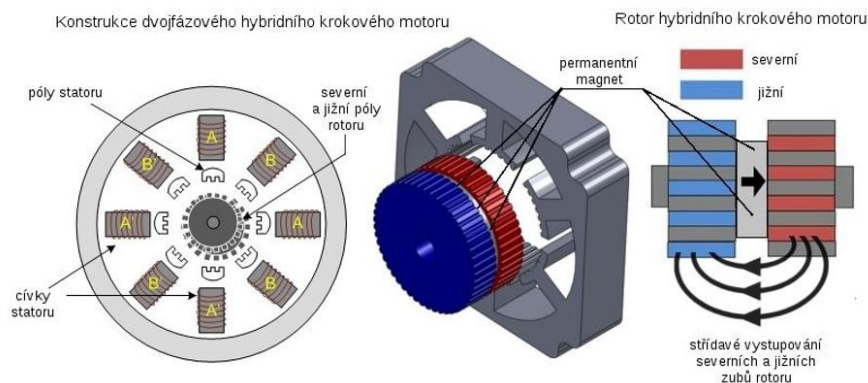
•Podle počtu vinutí na:

- **Dvoufázové** – standardní, nejpoužívanější
- **Vícefázové** – speciální pohony – nižší vibrace, jemnější krok, složitější konstrukce, vyšší cena

•Podle stavby rotoru na:

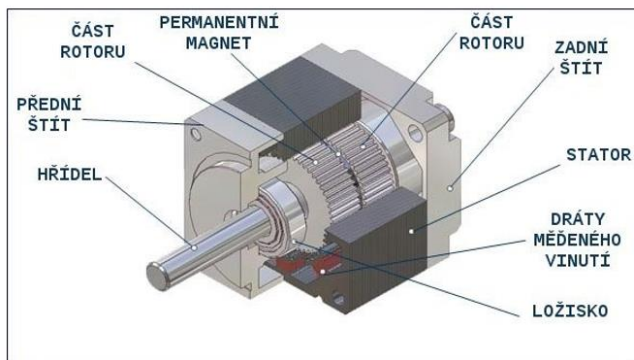
- **Reluktanční** (*reluktance = magnetický odpor*) motory využívají schopnosti magnetického obvodu natáčet se vždy do mechanické konfigurace s co nejmenší energií (co nejmenším magnetickým odporem). Vhodně tvarovaný magnetický obvod se zuby z magneticky vodivého materiálu se vždy natočí těmito zuby pod póly statoru s cívkami (zdroji magnetického toku), aby zvýšil magnetický tok a snížil magnetický odpor (reluktanci) celé konstrukce. Pouštěním proudu do cívek (nejjednodušeji zapínáním a vypínáním cívek) je potom možné s rotorem pohybovat.
- **Motor s permanentními magnety** využívá magnetického pole vytvořeného permanentními magnety, v magnetickém obvodu se potom objevuje daleko větší magnetický tok a motor je daleko "živější". Severní a jižní póly pak vytvářejí různě směřované toky po celém motoru a vhodným elektrickým proudem se pak motor roztáčí v různém směru.
- **Hybridní** znamená, že tento motor v sobě kombinuje dva typy motorů - reluktanční a motor s permanentními magnety. Hybridní krokový motor má vinutí ve statoru, permanentní magnet mezi částmi rotoru a vzduchovou mezeru mezi rotorem a státorem. Kuličková ložiska jsou pak jedinou třecí plochou při otáčení motoru.

Konstrukce krokového motoru



Obr. 3: Konstrukce krokového motoru

Na obrázku je znázorněna konstrukce hybridního dvoufázového motoru. Je zde patrné uspořádání cívek a jejich pólových nástavců statoru a umístění permanentních magnetů na rotoru motoru.



Obr. 4: Sestava krokového motoru

Zde je typická sestava krokového motoru. Jediné mechanicky namáhané součásti, které se opotřebovávají, jsou ložiska hřídele.



Obr. 5: Rozložený krokový motor



Obr. 7: Detail rotoru krokového motoru. Na obrázku je patrné umístění a vzájemné posunutí permanentních magnetů



Obr. 6: Detail umístění cívek statoru a jejich pólů. Jsou zde patrné jednotlivé „zuby“

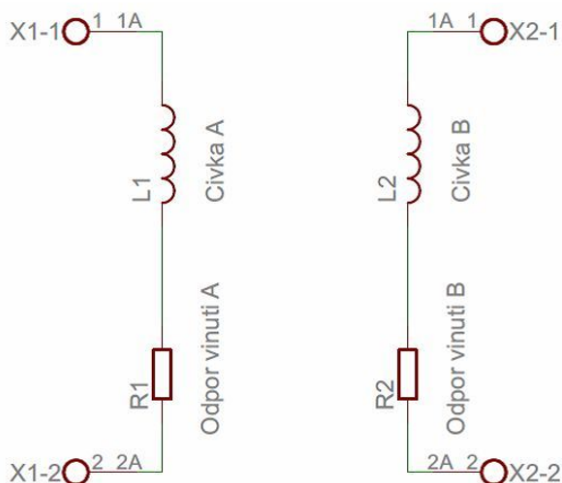


Obr. 8: Detail rotoru a jeho polohy vůči statoru. Shodné natočení „zubů“ označuje šipka.

Elektrické vlastnosti a schéma krokového motoru

Elektrické obvody krokového motoru se skládají ze dvou cívek (u dvoufázového motoru – nejčastější případ), které jsou napájeny stejnosměrným proudem. Jediný prvek, který omezuje velikost procházejícího proudu, je tedy pouze odpor vodiče cívky. Jelikož cívky mají relativně malý odpor, motor má tendenci se za provozu silně zahřívat. Z principu vyplývá, že motorem teče proud, i když se rotor nepohybuje.

Tuto skutečnost je nutné mít na zřeteli při návrhu řídicího obvodu a proud procházející motorem vhodným způsobem regulovat, případně motor chladit. Pro regulaci se nejčastěji používá pulsní šířková modulace (PWM – Pulse Width Modulation).

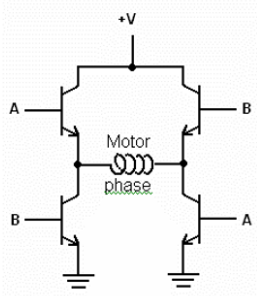


Obr. 9: Náhradní elektrické schéma dvoufázového krokového motoru

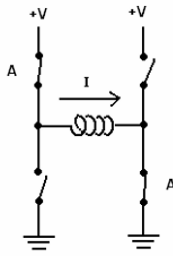
Cívka A je rozdělena do více sekcí, které jsou umístěny po obvodu statoru střídavě se sekcemi cívky B.

Ovládací elektrické obvody krokového motoru

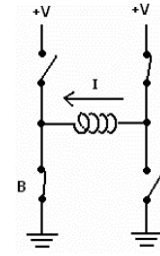
Jednotlivé cívky se u bipolárního motoru nejčastěji ovládají tranzistorovým můstkem složeným z bipolárních nebo unipolárních tranzistorů. Při návrhu koncového stupně je nutné nezapomenout na ochranu spínacích prvků proti napětovým špičkám, vznikajícím při spínání a odepínání indukčnosti. Tyto můstky bývají spolu s ochranami a budícími obvody součástí speciálních integrovaných obvodů, jejichž popis přesahuje rámec tohoto textu. Podrobnosti o nich najde zájemce na webových stránkách výrobců (STM, Allegro, TI apod.).



Obr. 10: Základní H-můstek



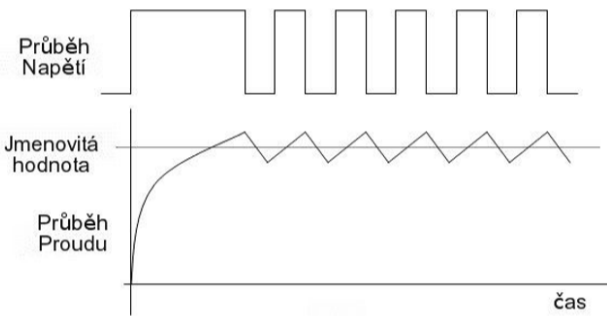
Obr. 11: Proud tekoucí fází A



Obr. 12: Proud tekoucí fází B

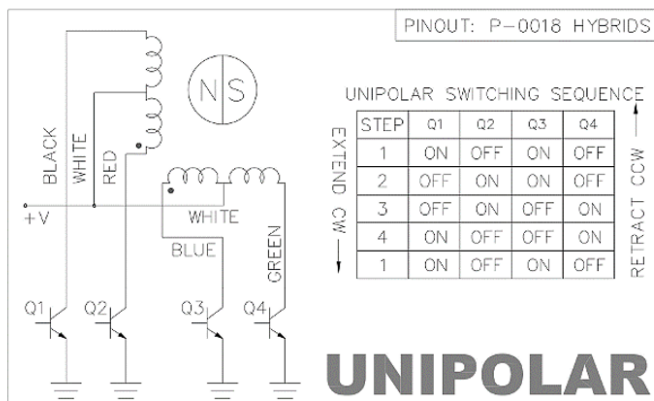
Průběh napětí a proudu v cívce při použití PWM

Je důležité nepřekročit maximální proud motoru. Budič, který využívá tento princip – *chopper*, je zpravidla vybaven snímacími rezistory v obvodu cívky, a tak lze pohodlně nastavit jmenovitou hodnotu proudu motoru. Další zvyšování proudu již nemá zpravidla vliv na zvyšování kroutícího momentu motoru, pouze se zvyšuje ztrátový výkon díky hysterezi magnetického obvodu.



Obr. 13: Průběh napětí a proudu v cívce při použití PWM

Řízení unipolárního motoru



Obr. 14: Princip řízení unipolárního motoru

•Unipolární dvoufázové řízení s plným krokem

Cívka 1	-	0	0	0
Cívka 2	0	-	0	0
Cívka 3	0	0	-	0
Cívka 4				

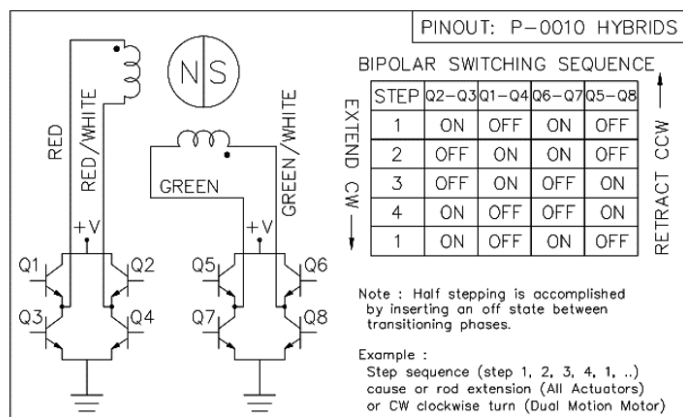
•Unipolární dvoufázové řízení s polovičním krokem

Cívka 1	-	0	0	-
Cívka 2	-	-	0	0
Cívka 3	0	-	-	0
Cívka 4	0	0	-	-

•Unipolární řízení s polovičním krokem

Cívka 1	-	-	0	0	0	0	0	-
Cívka 2	0	-	-	-	0	0	0	0
Cívka 3	0	0	0	-	-	-	0	0
Cívka 4	0	0	0	0	0	-	-	-

Řízení bipolárního motoru



Obr. 15: Princip řízení bipolárního motoru

•Bipolární jednofázové řízení s plným krokem

Cívka 1	-	0	+	0
Cívka 2	0	-	0	+
Cívka 3	+	0	-	0
Cívka 4	0	+	0	-

•Bipolární dvojfázové řízení s plným krokem

Cívka 1	-	+	+	-
Cívka 2	-	-	+	+
Cívka 3	+	-	-	+
Cívka 4	+	+	-	-

•Bipolární řízení s polovičním krokem

Cívka 1	-	-	0	+	+	+	0	-
Cívka 2	0	-	-	-	0	+	+	+
Cívka 3	+	+	0	-	-	-	0	+
Cívka 4	0	+	+	+	0	-	-	-

Kromě uvedených způsobů lze pro ovládání každého krokového motoru použít tzv. mikrokrokování. Lze toho dosáhnout regulací proudu, který protéká cívkou A a cívkou B. Určitý poměr proudů do fází A a B donutí motor krokovat i do oblastí, kam by se přirozeně nedostal (magnetické pole cívky A a cívky B má různou, proměnnou intenzitu). Motor je pak schopen pracovat s menším krokem, než na jaký je konstruován pro plný krok, pohyb je plynulejší, chod motoru tišší. Tento způsob řízení vyžaduje specializované integrované obvody a řídicí jednotky.

Mechanické vlastnosti krokového motoru

Krokový motor umožňuje velmi precizní řízení a polohování bez použití zpětné vazby – např. enkodérem. Může být použit v širokém spektru rychlostí, rychlost lze precizně řídit kmitočtem řídicích pulzů. Má velmi výhodnou momentovou charakteristiku při malých rychlostech, takže jej lze použít pro přímé ovládání zátěže bez převodovky. Při nulové rychlosti disponuje přídržným momentem, který udrží ovládanou zátěž ve stabilní poloze.

Největší nevýhodou krokového motoru je možnost ztráty kroku, pokud je překročena hodnota maximálního kroutícího momentu motoru. Tuto skutečnost je nutno mít na paměti při výběru motoru pro danou zátěž a při řízení a brždění motor postupně zrychlovat a zpomalovat (rozjezdové a dojezdové rampy). Je třeba si uvědomit, že moment vzniká i při roztáčení hmotného tělesa z klidové polohy.

Použití krokových motorů

Krokové motory se používají všude tam, kde je potřeba precizního a opakovatelného polohování. Např.:

- řízení os obráběcích strojů
- klouby robotů a manipulátorů
- výpočetní technika
- fotografické přístroje
- automatizace