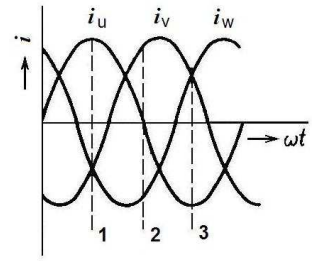


Vznik točivého pole a základní vlastností motoru

Asynchronní indukční motory jsou nejjednoduššími a provozně nejspolehlivějšími motory. Motor se skládá ze statoru a rotoru. Stator je tvořen vinutími 3 fází, jednotlivá vinutí (U, V, W) jsou posunuta o 120° po obvodu statoru. Rotor také obsahuje vinutí 3 fází, spojených do hvězdy. Statorová a rotorová vinutí jsou uložena v drážkách magnetických obvodů složených z tenkých plechů.



Trojfázová soustava proudů

Připojením k třífázové síti začne statorovými vinutími protékat proud, vzhledem k posunutí vinutí a fázovému posunutí jednotlivých proudů vytvoří statorové vinutí točivé magnetické pole protínající rotor. Je-li rotor v klidu indukuje se v jeho vinutí napětí a uzavřeným obvodem rotorového vinutí začne protékat proud. V tomto okamžiku se motor chová jako transformátor nakrátko s poměrně velkou rozptylovou reaktancí danou vzduchovou mezerou (2xδ) mezi rotorem a státorem. Vodiči rotoru začne protékat proud a protože se vodiče nachází v magnetickém poli statoru, působí na ně síla (její směr je dán pravidlem levé ruky), výsledkem je vznik točivého momentu otáčející rotor. Rotor se začne otáčet ve směru točivého pole statoru. V ideálním stavu by rotor po čase dosáhl otáček točivého pole statoru - synchronních otáček. V tomto okamžiku by se však v závitěch rotoru neindukovalo žádné napětí, protože by v ploše rotorového vinutí nedocházelo ke změně magnetického toku. Vzhledem k mechanickým ztrátám (v ložiskách) a ventilačním ztrátám se otáčky rotoru ustálí na otáčkách nižších než jsou otáčky synchronní.

Poměrný rozdíl synchronních otáček n_s a skutečných otáček n se nazývá skluz:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

Motory dosahují skluzu od 2 po 10%, **typická hodnota je 3+5 %**, u větších strojů je skluz menší. Synchronní otáčky jsou dány kmitočtem sítě a počtem pólových dvojic p (pólovou dvojicí tvoří 1 severní a 1 jižní pól vytvořený vinutím):

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p}$$

Počet pólů udává kolik cívek jedné fáze (statorového i rotorového vinutí) je v sérii zapojeno v jedné fázi. Nejjednodušší stroj má vinutí tvořené jednou cívkou uloženo ve dvou drážkách (pro 3 fáze = 6 drážek pro 3 vinutí). Prakticky má stroj nejméně 12 drážek a vinutí jedné fáze jsou uložena 4 drážkách, tím se současně vytváří vhodnější průběh magnetické indukce přibližující se sinusovému průběhu.

Počet pólových dvojic udává synchronní otáčky motoru a pro $f=50$ Hz:

$p=1$	$n_s = 3\ 000$ ot/min	$n = 2\ 700 - 2\ 850$ ot/min
$p=2$	$n_s = 1\ 500$ ot/min	$n = 1\ 350 - 1\ 425$ ot/min
$p=3$	$n_s = 1\ 000$ ot/min	$n = 900 - 950$ ot/min
$p=4$	$n_s = 750$ ot/min	$n = 675 - 735$ ot/min

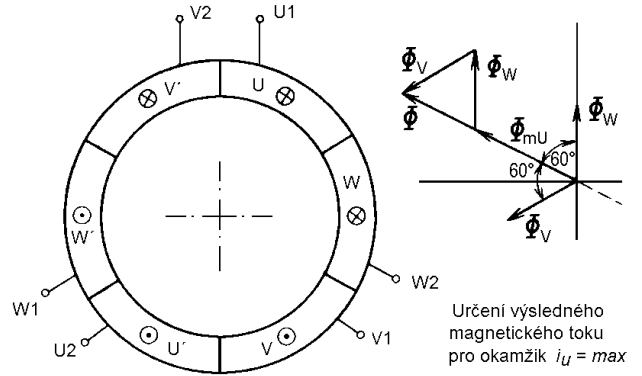
V rotorovém vinutí se indukuje napětí o kmitočtu:

$$f_2 = \frac{s \cdot n_s \cdot p}{60} = s \cdot f_1$$

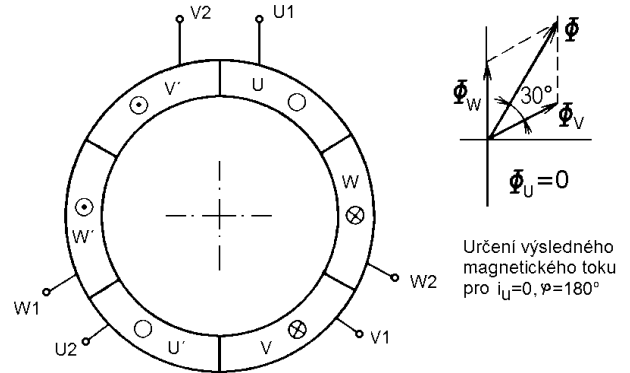
Pro omezení ztrát vířivými proudy musí být magnetický obvod rotoru s ložen z plechů, jejich tloušťka je však větší než u magnetického obvodu statoru.

Nejjednodušší rotorové vinutí může být realizováno formou tyčí spojených po obvodu prstenci nakrátko – klecovým vinutím-kotvou nakrátko.

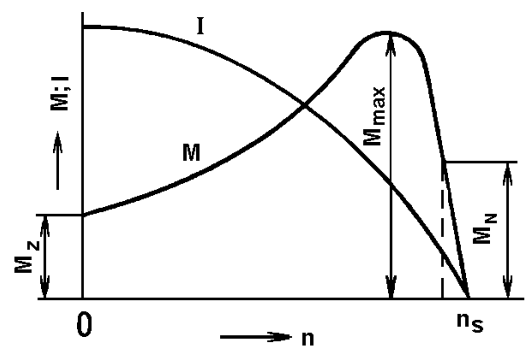
Velkou nevýhodou asynchronních motorů, zvláště s kotvou nakrátko, je poměrně velký záběrný proud dosahující 5 až 7 násobku I_N .



Určení výsledného magnetického toku pro okamžik $i_U = \max$



Určení výsledného magnetického toku pro $i_U=0, p=180^\circ$



Momentová charakteristika asynchronního motoru s kotvou nakrátko

Provozní stavy asynchronního motoru

a) Chod naprázdno

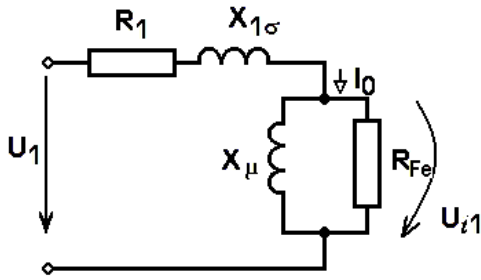
- otáčky se blíží n_s , indukované napětí je rovno téměř nule a točivý moment je nulový,
- činná složka proudu naprázdno pokrývá ztráty v magnetickém obvodu statoru a ztráty v ložiskách,
- jalová složka proudu naprázdno (magnetizační proud I_μ) je vzhledem k velkému rozptylu danému dvěma vzduchovými mezerami mezi rotorem a státorem a přesycováním zubů magnetického obvodu mezi vinutími – je podstatně větší než u transformátoru.
- účinnost je velmi malý $0,05 \pm 0,2$!, proto se chod naprázdno omezuje pouze na nezbytně nutnou dobu !
- I_0 dosahuje $10 \div 40$ % I_N – u velkých motorů je menší,
- proud I_{Fe} na rozdíl od transformátoru pokrývá i ztráty mechanické (v ložiskách a ventilační – sloužící k chlazení motoru),

$$I_{Fe} = \frac{\Delta P_0}{3 \cdot U_1} = \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech}}{3 \cdot U_1}$$

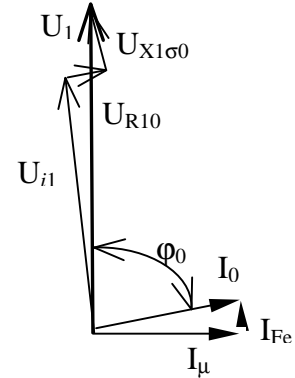
$$R_{Fe} = \frac{U_1}{I_{Fe}}$$

$$X_\mu = \frac{U_1}{I_0 \cdot \sin \varphi}$$

U_1 – fázové napětí



Náhradní schéma při chodu naprázdno



Fázorový diagram při chodu naprázdno

b) Chod nakrátko

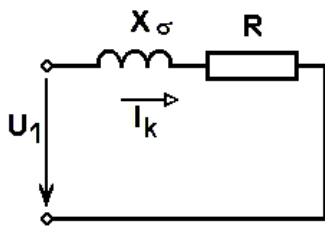
- statorové vinutí je napájeno plným napětím, $n=0$, $s=1$, v rotoru se indukuje nejvyšší napětí,
- pro účely měření je rotor zabrzděn a napájí se sníženým napětím,
- náhradní schéma se zjednoduší:

$$R = R_1 + R_{2l}$$

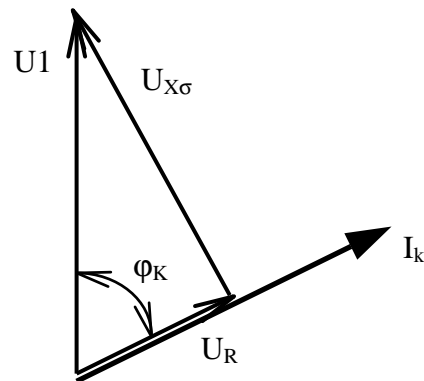
$$\frac{R_{2l}}{s} (1 - s) = 0$$

$$X_\sigma = X_{1\sigma} + X_{2l\sigma}$$

- vliv příčné impedance X_μ a odporu R_{Fe} lze zanedbat



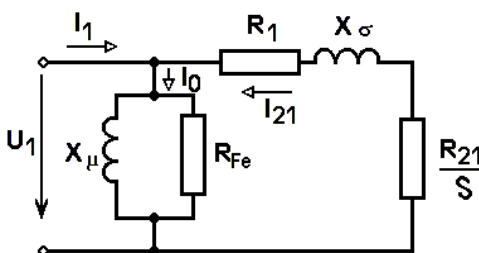
Náhradní schéma asynchronního motoru při chodu nakrátko



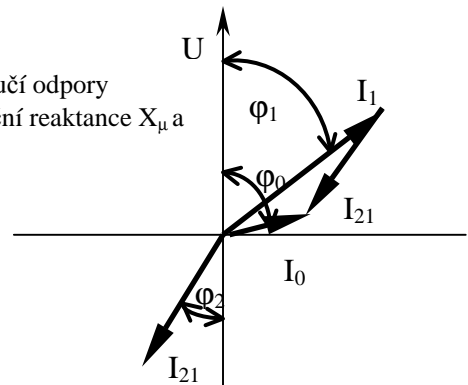
Fázorový diagram při chodu motoru nakrátko

c) Chod při zatížení

- vzhledem k velké hodnotě magnetizační reaktance X_μ a odporu R_{Fe} je možné provést zjednodušení v náhradní schématu motoru tím, že se sloučí odpory vinutí a rozptylové reaktance statorového i rotorového vinutí a magnetizační reaktance X_μ a odporu R_{Fe} jsou umístěny přímo na napájecí svorky,



Úplně zjednodušené schéma asynchronního motoru



Fázorový diagram asynchronního motoru při zatížení

d) **Točivý moment** (třífázového motoru):

- pro točivý moment platí:
$$M = \frac{P}{\omega} = 9,55 \frac{P}{n} = 9,55 \frac{P}{n_s(1-s)} \quad [\text{N.m; W, rad.s}^{-1}]$$

- skutečná úhlová rychlost:
$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$$

- točivý moment vytváří výkon přenášený vzduchovou mezerou:
$$P_\delta = 3 \cdot I_{21}^2 \cdot \frac{R_{21}}{s}$$

- dosadíme-li z náhradního schématu pro:
$$I_2 = \frac{sU_{i20}}{\sqrt{R_2^2 + s^2 X_{2\sigma}^2}} = \frac{U_{i20}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2\sigma}^2}} \quad (1)$$

- pro celkovou reaktanci stroje platí:
$$X_\sigma = X_{l\sigma} + X_{2\sigma}$$

- po dosazení do první rovnice je výsledný točivý moment:
$$M = \frac{P_\delta}{\omega} = \frac{3R_{21}}{s \cdot \omega_s} \cdot \frac{U_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_{21}}{s}\right)^2 + X_\sigma^2}$$

- kde ω_s je synchronní úhlová rychlost:
$$\omega_s = \frac{2\pi f_1}{p \cdot 60}$$

- při zanedbání statorového odporu $R_1 \ll \frac{R_{21}}{s}$ a zavedení celkové reaktance (nakrátko) $X_\sigma = X_{l\sigma} + X_{21\sigma}$ bude mít rovnice

momentu tvar:
$$M = \frac{3R_{21}}{s \cdot \omega_s} \cdot \frac{U_1^2}{\left(\frac{R_{21}}{s}\right)^2 + X_\sigma^2} \quad (2)$$

- derivaci podle skluzu s získáme rovnici pro maximum točivého momentu motoru - **bod zvratu**:

$$s_m = \frac{R_{21}}{X_\sigma} \quad (3)$$

$$M_{max} = \frac{3U_1^2}{2\omega_s X_\sigma} \quad (4)$$

Moment v bodě zvratu nezávisí na odporu vinutí, ale pouze na druhé mocnině napájecího napětí, jeho kmitočtu a celkové reaktanci motoru. Z podmínek v bodě zvratu vyplývá, že skluz je závislý na odporu rotorového vinutí a moment na druhé mocnině napájecího napětí, rozptylová reaktance a napájecí kmitočet jsou neměnné parametry motoru a sítě.

Dělením rovnice (2) rovnicí (4) a s použitím úprav rovnicí (3) získáme tzv. Klossův vztah popisující závislost momentu na skluzu:

$$M = \frac{2M_{max}}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} \quad (5)$$

Ideální momentová charakteristika se skládá:

a) z lineární části - $s < s_m$, skluz $s \approx (0; 0,2)$ - (od synchronních otáček po bod zvratu):

$$M = \frac{2M_{max}}{s_m} \cdot s \quad (6)$$

$$\Rightarrow M \approx k \cdot s$$

b) z hyperbolické části $s > s_m$, $s \rightarrow 1$:

$$M = 2M_{max} s_m \frac{1}{s} \quad (7)$$

$$\Rightarrow M \approx \frac{k}{s}$$

Skutečná momentová charakteristika se ideální nejvíce přibližuje v oblasti jmenovitých otáček a při rozběhu motoru.

V oblasti skluzů $s=(0;s_m)$, (pracovní oblast užití motorů) je závislost skluzu téměř lineární (přímková) a se snižujícími se otáčkami (skluz roste) stoupá točivý moment, svého nejvyšší hodnoty dosahuje moment v bodu zvratu M_m . Při poklesu otáček pod bod zvratu $s=(s_m;1)$ dochází s poklesem otáček k poklesu točivého momentu, přetěžovaný motor se zastaví (průběh momentové charakteristiky je hyperbolický). Z toho plyne, že motor v oblasti skluzu $s=(s_m;1)$ nelze provozovat, se snižováním otáček klesá točivý moment!

Záběrný moment (s=1):

- je moment v okamžiku připojení motoru k síti: $s=1$, $I_{21}=I_{21k}=I_{1k}$ dosazením do rovnice pro moment a výkon P_σ přeneseného

$$\text{vzduchovou mezenou: } M = 9,55 \frac{P}{n_s(1-s)} = 9,55 \frac{3R_{21}I_{1k}^2}{n_s}$$

$$\text{- záběrný proud: } I_{1k}^2 = \frac{U_1^2}{(R_1 + R_{21})^2 + X_\sigma^2}$$

- z rovnice vyplývá, že záběrný moment je závislý pouze na velikosti rotorového odporu a velikosti druhé mocniny proudu I_1 (I_1^2), tedy i druhé mocnině pájecího napětí U_1 (U_1^2).
- při zavedení zjednodušujících předpokladů pro rovnici (2) platí pro záběrný moment (s=1):

$$M_z = \frac{3R_{21}}{\omega_s} \cdot \frac{U_1^2}{R_{21}^2 + X_\sigma^2} \quad (5)$$

- záběrný moment je úměrný druhé mocnině napájecího napětí a při velké rozptylové reaktanci stojícího motoru výrazně neovlivňuje rotorový odpor druhý člen jmenovatele rovnice \Rightarrow zvyšováním rotorového odporu lze dosáhnout většího záběrného momentu.

Pro asynchronní motory je normalizována tzv. **momentová přetížitelost** daná poměrem:

$$\frac{M_m}{M_N} \geq (1,5 \text{ až } 2)$$

kde: M_m – moment zvratu,
 M_N – jmenovitý moment.

e) Ztráty asynchronního motoru

Motor odebírá ze sítě příkon P_1 a na hřídeli předává zátěži výkon P .

Ztráty se dělí na: ΔP_{j1} – Jouleovy ztráty ve vinutí statoru (tepelné $P = R \cdot I^2$),
 ΔP_{Fe} – ztráty v železe statoru (rotorový kmitočet f_2 je při provozu malý 2÷5 Hz),
 ΔP_{j2} – Jouleovy ztráty ve vinutí rotoru,
 ΔP_{mech} – mechanické ztráty (v ložiskách a ventilátorech pro hlazení),
 ΔP_s – ztráty ve spouštěči kroužkového motoru.

Výkon přenesený vzduchovou mezerou:

$$P_\delta = P_1 - \Delta P_{Fe} - \Delta P_{mech} - \Delta P_{j1}$$

Tento výkon se přeneše na rotor, kde se z něho hradí ΔP_{j2} – Jouleovy ztráty ve vinutí rotoru.

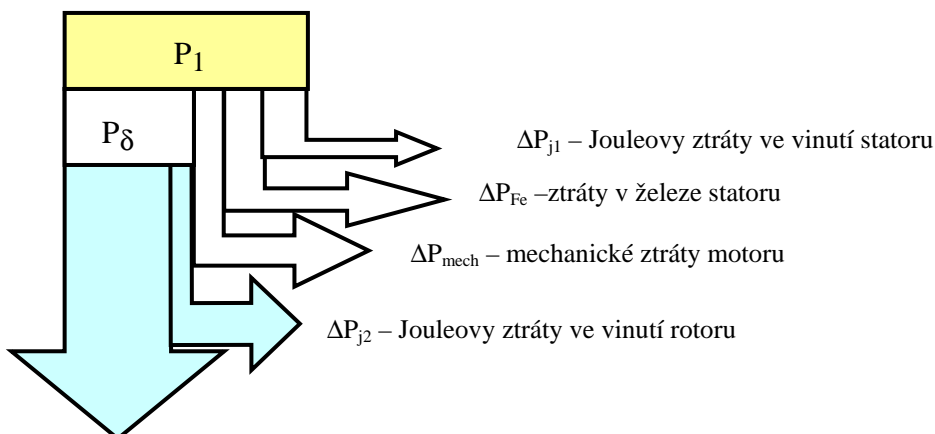
Výsledný výkon na hřídeli motoru:

$$P = P_\delta - \Delta P_{j2}$$

$$P = 3 \cdot \frac{R_{21}}{s} I_{21}^2 - 3 \cdot R_{21} I_{21}^2 = 3 \cdot \frac{R_{21}}{s} I_{21}^2 (1-s)$$

$$P = P_\delta (1-s)$$

Rozdělení ztrát asynchronního motoru



P – mechanický výkon
na hřídeli

Provedení asynchronních motorů**a) Kroužkový motor**

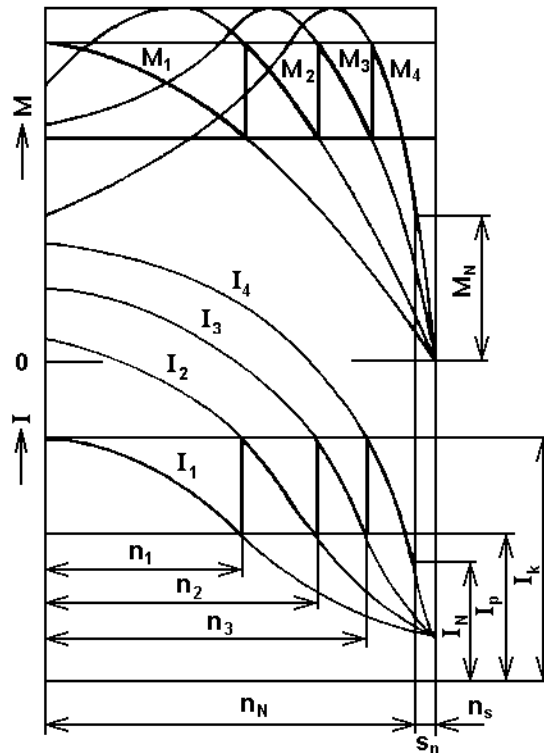
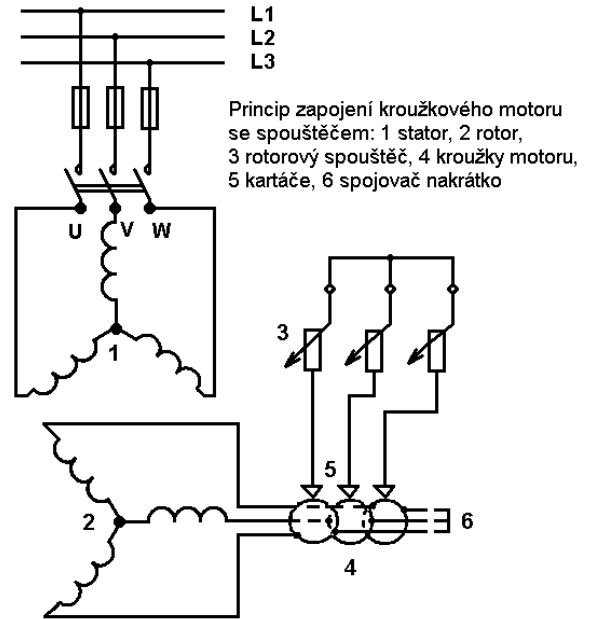
Umožňuje omezit záběrný proud a současně zvětšit záběrný moment, toho se dosahuje zvětšením odporu rotorového vinutí.

Rotorové vinutí je vyvedeno na kroužky (měděné izolované uložené kotouče), na které dosedají uhlíkové kartáče spojené s spouštěčem. Spouštěč se skládá ze 3 odstupňovaných odporů zapojených do hvězdy Y.

Před zapnutím motoru je spouštěč nastaven na největší odpor a postupně, tak jak rostou otáčky rotoru, dochází ke snižování hodnoty rotorového proudu. Po dosažení provozních otáček je spouštěč vyřazen a rotorové vinutí je spojeno nakrátko spojovačem. Výsledkem takového spouštění je plynulý rozběh motoru s poměrně velkým záběrným momentem a omezeným proudem.

U motoru je nutné hlídat pokles (případně výpadek) napětí, aby nedošlo při obnovení dodávky proudu k nežádoucímu proudovému nárazu, současně je i záběrný moment motoru s kotvou nakrátko nedostatečný pro rozběh zatíženého stroje, čímž hrozí jeho zničení (*bez velkého odporu spouštěče není motor schopen zátěž roztočit*).

Spouštěč nelze užít k regulaci otáček – není dimenzován na tak velké tepelné ztráty, vznikající při rozběhu a regulaci otáček.



Průběh momentů a proudů při spouštění kroužkového motoru

b) Motor s kotvou nakrátko

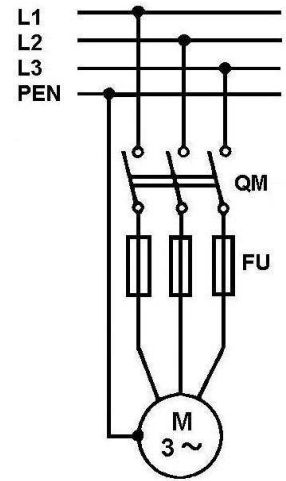
Kroužkový motor je výrobně drahý a vyžaduje řízení spouštění. Pro nejjednodušší a nenáročné pohony nezatížených strojů je postačující motor s kotvou nakrátko.

Rotorové vinutí tohoto motoru je tvořeno hliníkovými (měděnými, bronzovými) tyčemi uloženými v drážkách magnetického obvodu rotoru složeného z tenkých plechů (potlačení vřívých proudů) spojených na čelech rotoru nakrátko. Toto vinutí se nazývá klecové. Motor odebírá velký záběrný proud - vinutím rotoru (*jednotlivými závity klecového vinutí*) o velkém průřezu prochází značný proud.

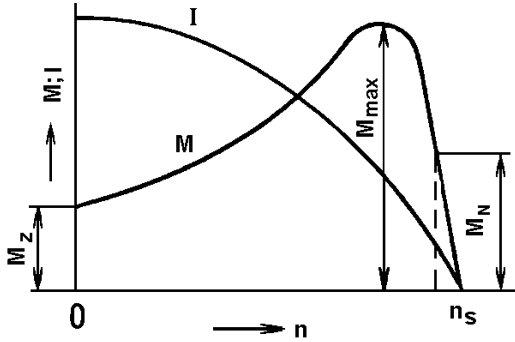
Omezení záběrného proudu lze dosáhnout provedením rotorového vinutí z materiálu s větším odporem – mosaz nebo silumin.

Výsledkem je kromě omezení proudu také zvýšení záběrného momentu, klesá však účinnost motoru.

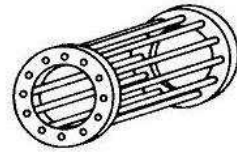
Odporové klece se užívají u motorů pohánějících zatížené stroje pracují krátkodobě – jeřáby a výtahy.



Zapojení 3~ asynchronního motoru



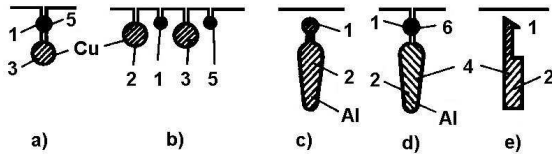
Momentová charakteristika asynchronního motoru s kotvou nakrátko



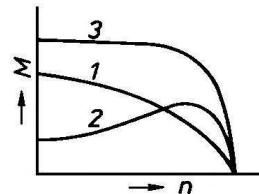
Klecové vinutí rotoru

Dvojitá klec (Boucherotova) - v drážce rotoru jsou 2 klece s různým odporem – různých průřezů nebo materiálů (mosaz, bronz, silumin) umístěných nad sebou. Rozběhová klec je blíže ke vzduchové mezeře a její rozptylová indukčnost je menší, ale má větší odpor. Pracovní vinutí s menším odporem je hlouběji v drážce a při rozběhu vykazuje tuto vinutí velkou rozptylovou reaktanci a proto tímto vinutím prochází při rozběhu menší proud. Výsledná momentová charakteristika obou vinutí má velký záběrný moment a současně je i menší záběrný (rozběhový) proud.

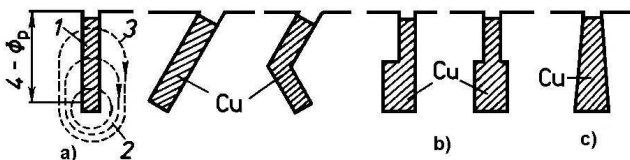
Vírová klec má úzké a hluboké drážky rotorového vinutí (mnohdy dole rozšířené) vyplněné nejčastěji hliníkem tvořím klecové vinutí. Vírová klec se při rozběhu chová stejně jako dvojitá klec, v dolní části drážky se vytváří velký rozptylový tok omezující záběrný proud a současně dochází ke zvýšení záběrného momentu.



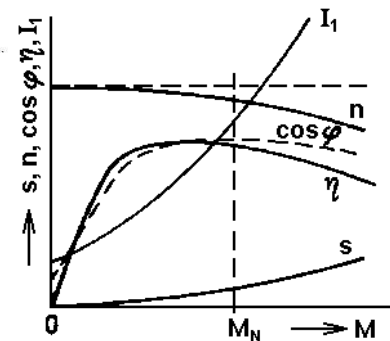
Různé druhy dvojitých klecí motorů nakrátko:
 a) kombinovaná dvojitá klec, b) jiná úprava dvojité klece,
 c) hliníková klec, d) klece pro motory nad 50 kW,
 e) tvar klece vhodný pro výrobu;
 1 rozběhová klec (mosaz, bronz), 2 pracovní klec (měď),
 3 měď, 4 hliník, 5 mosaz nebo bronz, 6 silumin



Momentové charakteristiky dvouklecového motoru:
 1) charakteristika rozběhová M_r ,
 2) charakteristika pracovní M_p ,
 3) charakteristika výsledná



Různé druhy tyčí vírové klece;
 a) tyče stejných šířek, b) tyče odstupňované, c) klínový tvar pro rychloběžné motory;
 1 úzký masivní měděný vodič, 2 spodní vlákna vodiče,
 3 horní vlákna vodiče, 4 rozptylový magnetický tok Φ_r



Průběh charakteristik motoru nakrátko

Spouštění asynchronních motorů

Problémem spouštění asynchronních motorů je velký záběrový proud způsobující velké (nepřípustné) úbytky napětí v napájecí síti. Proto se používají různé způsoby omezení záběrových proudů, zvláště v sítích nn.

- a) **Přímé připojení motorů s kotvou nakrátko** - je možné v sítích nn provádět je-li spouštěcí příkon do 22 kVA, tomu pro napětí 3x230/400 V odpovídá výkon motoru nejvýše 3 kW. Větší příkony je možné přímo spouštět pouze po dohodě s dodavatelem energie, má-li spotřebitel vlastní transformátor lze spouštět až výkony stovek kW.

b) **Přepínání hvězda trojúhelník D/Y**

- točivý moment motoru podle rovnice (2):

$$M = \frac{3R_{21}}{s \cdot \omega_s} \cdot \frac{U_1^2}{\left(\frac{R_{21}}{s}\right)^2 + X_\sigma^2}$$

- moment asynchronního motoru je závislý na druhé mocnině napájecího napětí U_1 ,
- v zapojení do trojúhelníka je vinutí motoru napájeno sdruženým napětím,
- v zapojení do hvězdy je vinutí motoru napájeno napětím fázovým pro které platí:

$$U_f = \frac{U_s}{\sqrt{3}}$$

- pro poměr momentu při napájení sdruženým napětím k napájení fázovým napětím platí:

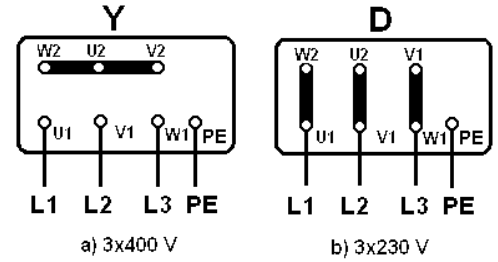
$$\frac{M_D}{M_Y} = \frac{U_s^2}{U_f^2} = \frac{(\sqrt{3}U_1)^2}{U_1^2} = 3$$

$$M = \omega P$$

- motor v zapojení do trojúhelníka (D) 3x větší moment a příkon než v zapojení do hvězdy (Y), tomu odpovídá i velikost odebíraného proudu, která je v zapojení do hvězdy pouze 1/3 v porovnání se zapojením do trojúhelníka,

$$I_D = 3 \cdot I_Y$$

- v síti 230/400 V lze přepínat do trojúhelníka pouze motory určené pro napětí 230/400 V (220/380 V),
- přepínání D/Y patří mezi nejrozšířenější a nejjednodušší způsoby omezení záběrného proudu (na 1/3),
- nejprve se motor rozbíhá v zapojení do hvězdy a po dosažení jmenovitých otáček se provede přepnutí do trojúhelníka,
- nejjednodušší provedení je spouštěcím tlačítkem při stykačovém provedení přepínače nebo ručním přepínačem D/Y- kdy obsluha podle chování motoru (hluku při otáčení) rozhodne o okamžiku přepnutí,
- **tento způsob lze použít pouze u pohonu strojů rozbíhajících se naprázdno, kdy k zatížení dojde až po roztočení stroje.**



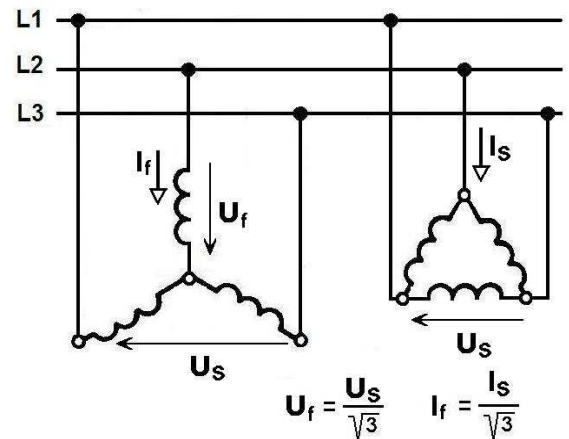
a) 3x400 V

b) 3x230 V

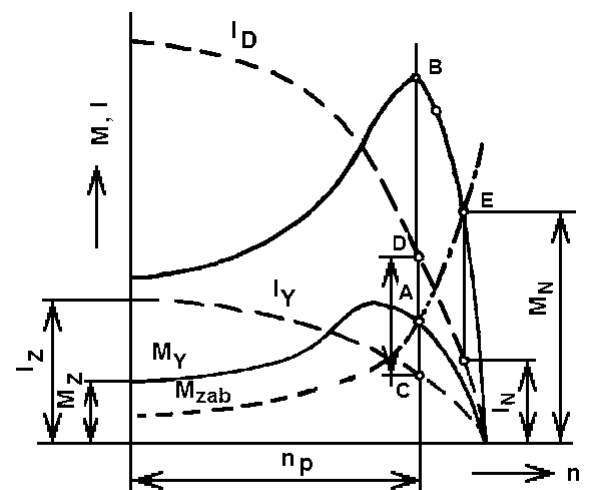
Svorkovnice trojfázového asynchronního motoru

a) vinutí spojeno do hvězdy

b) vinutí spojeno do trojúhelníka



Zapojení vinutí 3-fázového asynchronního motoru do hvězdy a do trojúhelníka trojúhelníka, porovnání napájecích napětí



Momentová a proudová charakteristika motoru nakrátko pro spouštění Y/D

c) Kroužkové motory

Využívají rovnici (2) – zvětšení rotorového odporu o s odpor spouštěče.

Spouštěč je realizován odstupňovaným odporem zapojený do série s rotorovým vinutím zapojeným do hvězdy.

Motor má 3 kroužky umožňující připojení rozběhových odporů spouštěče. Před zapnutím motoru je na spouštěči nastavena největší hodnota odporu, po zapnutí s rostoucími otáčkami se odpor snižuje a při dosažení provozních otáček je spouštěč překlenován spojovačem nakrátko – rotorové vinutí je spojeno přímo do hvězdy. Vzhledem k velkým ztrátám nelze spouštěč užít k regulaci otáček.

Motor musí být vybaven podpěťovou ochranou zamezující spuštění bez správně nastaveného spouštěče.

Momentová charakteristika při spouštění je měkčí než při provozu. Při vhodné volbě rezistorů spouštěče může být záběrný moment roven maximálnímu.

Kroužkové motory se používají k rozběhu zatížených a těžko se rozbíhajících strojů.

d) Autotransformátory

V rovnici (2) využíváme snížení napájecího napětí.

Snížením napájecího napětí se omezí záběrový a proud, ale současně dojde ke snížení záběrného momentu a to s druhou mocninou napájecího napětí – viz. přepínání D/Y. V porovnání se spouštěním kroužkového motoru je užití autotransformátoru méně ztrátové, avšak lze ho využít pouze **pro spouštění nezatížených motorů** velkých výkonů, kde již nelze použít přepínání D/Y. Obdobně lze snížit záběrný proud použitím tlumivky.

Spouštění rozběhovou spojkou

Motor se rozbíhá naprázdno, po dosažení provozních otáček se zátěž připojí spojkou. Rozběhový proud není omezen co do velikosti, ale je zkrácena doba rozběhu.

Tento způsob spouštění se používá již velmi ojediněle.

e) Speciální klece**1) Odporová klece (obrázek na straně 6)**

Využívají v rovnici (2) zvýšení rotorového odporu, tím dochází ke snížení proudu.

Maximální moment může být roven záběrnému. Momentová charakteristika je velmi měkká, otáčky značně kolísají se zatížením. Motory se užívají k pohonu zvedacích a krátkodobě používaných zařízení s těžkým rozběhem.

2) Dvojitá klece (obrázek na straně 6)

Motor využívá v rovnici (2) zvýšení reaktance rotorového vinutí k omezení rozběhového proudu.

V horní části drážky se nachází odporové vinutí, v dolní části pracovní vinutí o větším průřezu z materiálu s větší měrnou vodivostí. Při velkého skluzu (při rozběhu) vykazuje pracovní vinutí v důsledku umístění v hluboké drážce velkou reaktanci, tím se omezí velký záběrný proud. Momentová charakteristika motoru s dvojitou klecí je součtem charakteristik odporového a pracovního vinutí. V oblasti pracovního zatížení je momentová charakteristika tvrdá, současně má motor velký záběrný moment.

3) Vírová klec (obrázek na straně 6)

Rotorové vinutí je umístěné hluboké drážce rotoru. Při rozběhu je v důsledku vysokého rotorového kmitočtu rozložení proudové hustoty u povrchu drážky velké a v hloubce pak malé, tím motor vykazuje velký odpor rotoru a současně velkou reaktanci rotorového vinutí. Momentová charakteristika je obdobná jako u motoru s dvojitou klecí, ale výrobně je motor s vírovou klecí levnější.

Řízení otáček

Nevýhodou asynchronních motorů je malá možnost regulace otáček.

Obecně u asynchronního motoru se zátěží klesají otáčky, ale roste točivý moment. To však platí pouze do bodu zvratu, v tomto okamžiku začne moment klesat a otáčky také klesají až k nule, hrozí zastavení motoru a jeho zničení v důsledku přehřátí vinutí a následného poškození mezizávitové izolace.

Dnes se regulace řeší napájením motoru polovodičovým kmitočtovým měničem umožňujícím změnu kmitočtu napájecího napětí a tím i otáček motoru.

1) Změnou kmitočtu

$$\omega = \frac{2\pi f_1}{p}$$

kde: p – počet pólových dvojic
Maximální moment z rovnice (4)

$$M_{max} \approx \frac{U_1^2}{\omega_s X_\sigma}$$

Z indukčního zákona platí:

$$U_1 \cong 4,44\Phi f_1 N_1$$

pro magnetický tok pak platí:

$$\Phi \approx \frac{U_1}{f_1}$$

Aby se předešlo přesycení magnetického obvodu při snižování kmitočtu musí současně docházet ke snižování napětí.

Za předpokladu $R_1 \neq 0$ se bude moment zvratu nepatrně zmenšovat s poklesem kmitočtu.

Řízení otáček změnou kmitočtu je moderní ekonomický způsob regulace otáček. Moderní pohony používají pro napájení motorů polovodičové měniče kmitočtu.

2) Přepínáním počtu pólů

Lze provést pouze u motorů s kotvou nakrátko (počet pólů statoru a rotoru musí být shodný) a realizuje se:

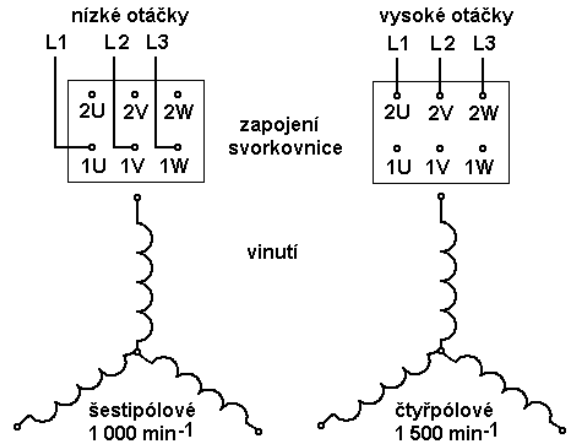
a) motorem se samostatnými vinutími pro rozdílné otáčky:

- motor má nejčastěji dvě samostatná vinutí s rozdílným počtem pólů,
- při přepínání se musí zajistit pouze stejný směr otáčení magnetického pole statoru,
- poměr počtu pólů v jednotlivých vinutích může být různý.

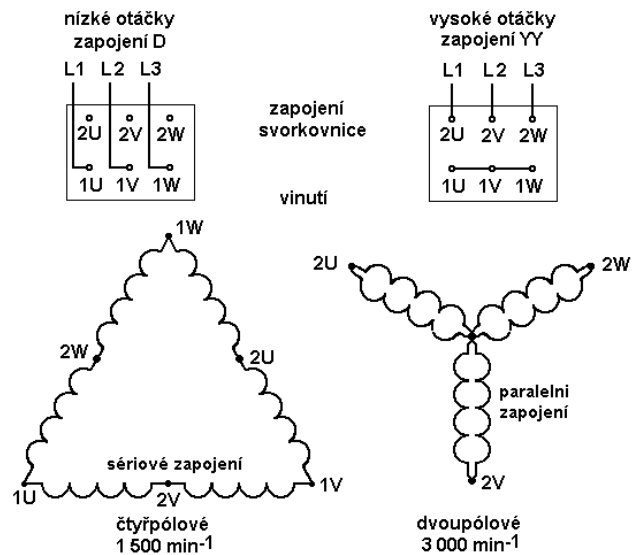
b) přepínáním zapojení statorového vinutí:

- statorové vinutí každé fáze je rozděleno na dvě poloviny,
- sériovým nebo paralelním řazením vinutí každé fáze lze dosáhnout dvojích otáček,
- poměr otáček je **1 : 2**,
- vinutí lze zapojit do hvězdy, dvojitě hvězdy, trojúhelníka nebo dvojitě trojúhelníka.

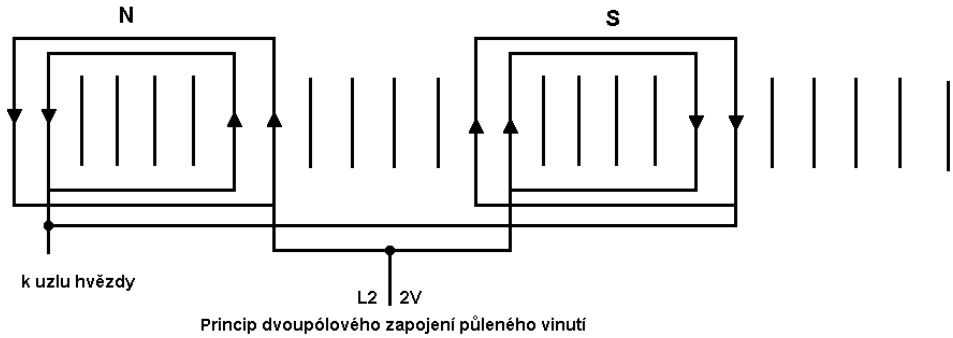
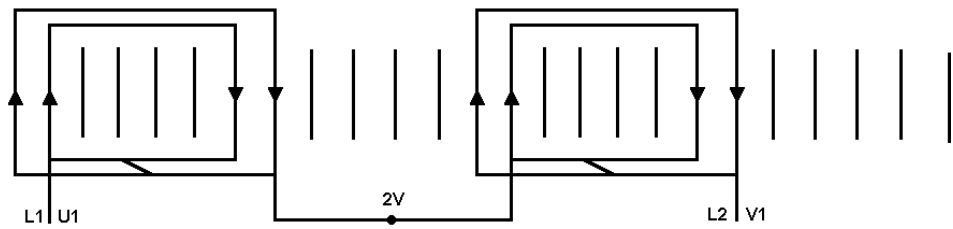
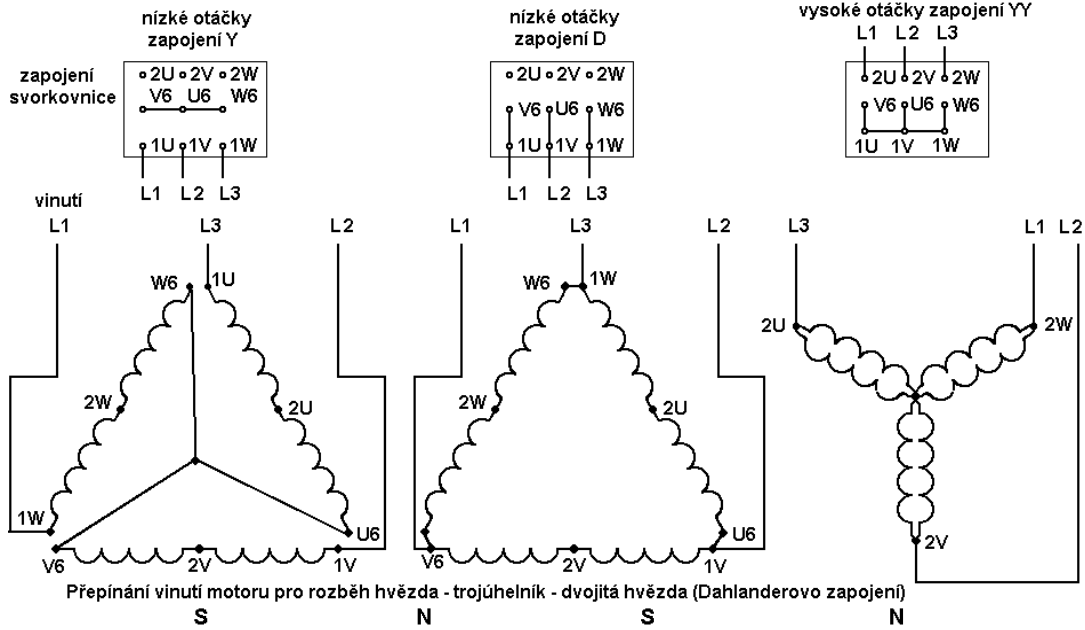
Používá se hlavně u dopravních zařízení a obráběcích strojů.



Motor s přepínáním počtu pólů se dvěma oddělenými vinutími



Zapojení vinutí pro přepínání počtu pólů 2-4 pólový motor



2) Změnou napětí přiváděného k motoru

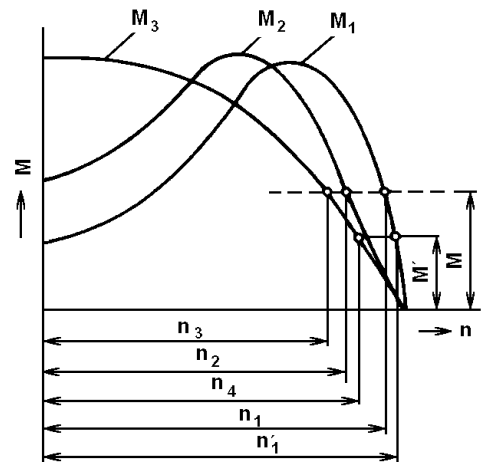
- užívá se velmi omezeně – pouze u motorů s odporovým rotorem, viz. rovnice (2)

3) Změnou přídavné impedance zařazené v sérii s vinutím statoru nebo rotoru

- nejčastěji se používá zapojení odporu do vinutí rotoru kroužkového motoru,
- výsledná charakteristika je měkčí,
- rozsah řízení je plynulý, ale malý (0,7 až 1 ω_N)
- řízení je ztrátové (neekonomické).

4) Rezonančním obvodem v rotoru

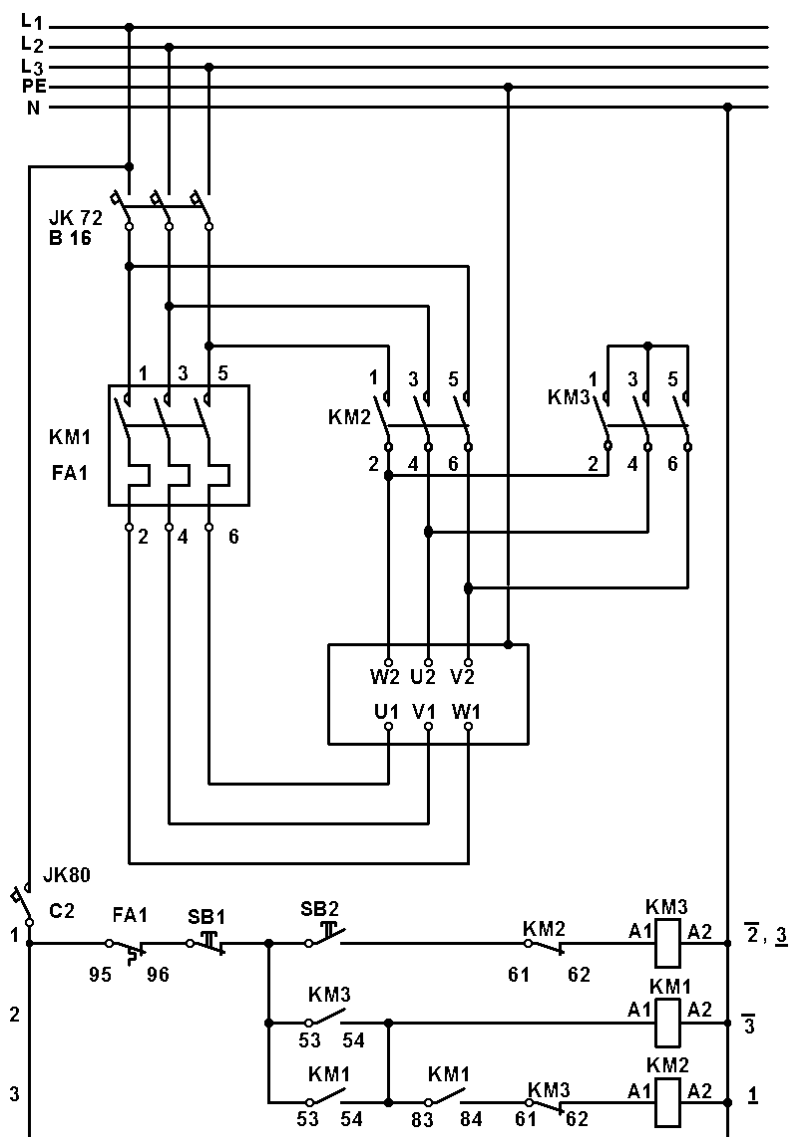
- na kroužky rotoru se připojí laditelný sériový LRC obvod,
- při rezonanční kmitočtu dojde k nárůstu rotorového proudu a tím posunutí neměnného momentu zvratu na jiný skluz, viz vzorec 4 strana 3
- v oblasti provozního zatížení se momentová charakteristika stává měkčí



Změna otáček zařazením rezistoru do rotoru kroužkového motoru

5) Pulsní řízení

- motor se opakovaně zapojuje a odpojuje k napájení,
- rychlost motoru se ustálí na střední hodnotě závislé na době zapnutí
- volba doby zapnutí a vypnutí je ovlivněna momentem setrvačnosti motoru a pohonu.



Popis silové části:

- JK72 – jistič chránící motor před nadproudem,
- KM1 – stykač s tepelným relé FA1,
- KM2 – stykač pro chod v zapojení do trojúhelníku,
- KM3 – stykač pro chod v zapojení do hvězdy,

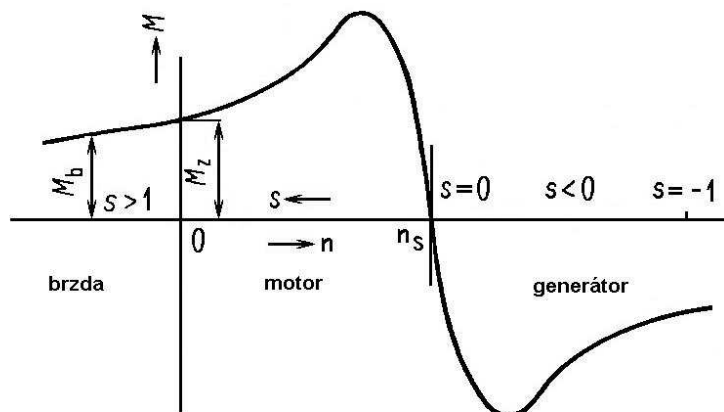
Popis ovládací části:

- JK80 – jistič obvodů ovládaní,
- FA1 95-96 – rozpínací kontakty tepelného relé,
- SB1 – vypínací tlačítko,
- SB2 – zapínací tlačítko,
- KM A1-A2 – ovládací cívky stykačů,
- KM 53-54, 83-84 – pomocné zapínací kontakty stykačů
- KM 61-62 – pomocné rozpínací kontakty stykačů

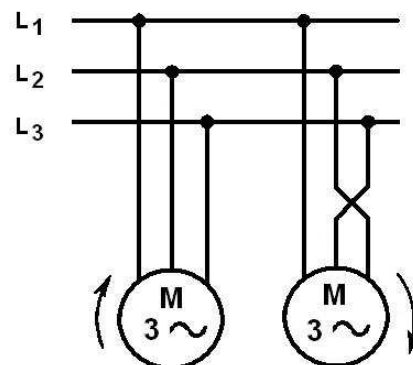
Asynchronní stroj může pracovat také jako generátor nebo brzda.

Jako **generátor** pracuje asynchronní motor tehdy dojde-li ke zvýšení jeho otáček nad synchronní otáčky ($s < 0$), motor je ve smyslu točivého magnetického pole roztáčen například vodní turbínou nebo zátěží. Stroj je schopen dodávat činný výkon, avšak ze sítě odebírá magnetizační proud (jeho velikost je možné omezit kondenzátory). Kmitočet napětí je dán kmitočtem sítě, pouze množství vyráběného činného výkonu je závislé na otáčkách (s poklesem otáček klesá činný výkon). Asynchronní generátor nevyžaduje přesnou regulaci otáček jako synchronní generátory elektráren, proto je používá u malých vodních elektráren.

Jako **brzda** (*zpomaluje pohon*) pracuje asynchronní stroj otáčí-li se magnetické pole statoru proti otáčkám rotoru ($s > 1$). Brzdný moment není stálý a proud odebíraný ze sítě je větší než při záběru.



Momentová charakteristika asynchronního stroje ve všech provozních stavech



Obrácení smyslu otáčení trojfázového asynchronního motoru

Kompenzace

Jednou ze špatných vlastností asynchronních motorů je malý účinník $\cos \varphi$ (velký fázový posun φ) nezátížených motorů. Tento problém se odstraňuje kompenzací, tj. připojením zátěže kapacitního charakteru. Špatný účinník zvětšuje úbytky napětí na vedeních, neumožňuje plně využít výkonů transformátorů, generátorů a přenosových možností vedení.

Kompenzace může být jednotlivá (viz obrázek), kdy kompenzační kondenzátory jsou připojeny k vinutí motoru. U skupinové kondenzace je kondenzátorová baterie připojena k podružnému rozvaděči, přívodní vedení ke kondenzátorům se pak musí vybavit vypínačem a jističem. Při centrální kompenzaci je kondenzátorová baterie připojena k hlavnímu rozvaděči, opět musí být vybavena vypínačem a jističem. Při skupinové a centrální kompenzaci musí být z bezpečnostních důvodů kondenzátory vybaveny vybíjecími rezistory (při jednotlivé kompenzaci se kondenzátory vybíjí přes vinutí stroje) zajišťujících vybití kondenzátorů po jejich odpojení od sítě.

Při manipulaci s kondenzátory musí být svorky kondenzátorů zkratovány !

Pro dosažení většího kompenzačního výkonu se přednostně kompenzační kondenzátory zapojují do trojúhelníku.

Pro velikost proudu kondenzátoru platí:

$$I_C = \omega \cdot C \cdot U \quad [\text{A}; \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}, \text{F}, \text{V}]$$

$$I_C = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot U \quad [\text{A}; \text{Hz}, \text{F}, \text{V}]$$

Pro průmyslový kmitočet $f=50\text{Hz}$ platí:

$$I_C = 314 \cdot C \cdot U \quad [\text{A}; \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}, \text{F}, \text{V}]$$

$$C = \frac{I_C}{314 \cdot U} \cdot 10^{-6} \quad [\mu\text{F}, \text{A}, \text{V}]$$

kde: C – kapacita kondenzátoru v μF ,

I_C – požadovaný kompenzační proud jedné fáze

U - sdružené napětí sítě

