



# Skripta

Školní rok : 2005 / 2006

**Modul: ELEKTRICKÉ STROJE**  
skripta 9

elementární modul: **ASYNCHRONNÍ MOTORY**

**Obor:**  
**26-43-L/001 - Mechanik elektronik**  
-----  
**26-51 H/003 – Elektrikář - silnoproud**  
-----  
**26-41/L501 – Elektrotechnika**

**Ročník:**  
**2. ročník - Mechanik elektronik - denní maturitní studium**  
-----  
**2. ročník - Elektrikář – učební obor**  
-----  
**1. ročník – Elektrotechnika – nástavbové studium**  
-----  
**1. ročník – Elektrotechnika – dálkové studium**

**Výukové cíle:**

- V tomto modulu - bloku se poznáte principy elektrických asynchronních motorů
- Získáte celkový přehled o jejich konstrukci a provedení, rozdělení a uspořádání, ovládání a užití elektrických strojů.
- Budete znát rozdělení asynchronních motorů
- Budete vědět jak je konstruován motor nakrátko a motor kroužkový
- Budete schopni nakreslit schéma zapojení a ovládání asynchronních trojfázových motorů
- Budete znát jak se spouští asynchronní trojfázové motory
- Budete vědět co je to reverzace a jak se provádí
- Budete znát jak se řídí otáčky asynchronních trojfázových motorů
- Porozumíte momentové charakteristice
- Budete vědět co to jsou jednofázové asynchronní motory

**Pojmy k zapamatování**

Generátor, motor, alternátor, motor nakrátko, motor kroužkový, stator, rotor, ložiskové štíty, magnetický obvod, statorový a rotorový svazek, vinutí, klec, kroužky, kartáče, elektromagnetická indukce, motor nakrátko, motor kroužkový, rychlost otáčení točivého magnetického pole, synchronní rychlost, skluz, rychlost otáčení, směr otáčení, točivé magnetické pole, točivý moment, počet pólů, spojení do hvězdy a do trojúhelníka, poměr příkonu při zapojení do trojúhelníku a příkonu při zapojení do hvězdy, energetická bilance, momentová charakteristika, úhlová rychlost, otáčky motoru, závislost výkonu motoru na otáčkách, maximální výkon, výkon na hřídeli, maximální moment, *moment zvratu*, momentová přetížitelnost, záběrný moment, provedení kotvy, stabilní a labilní část momentové charakteristiky, vliv napájecího napětí na výkon a moment asynchronního motoru, regulace otáček, spouštění asynchronního motoru nakrátko, záběrný proud, dovolený pokles napětí, přepínač hvězda trojúhelník,

**Kontrolní otázky**

1. Jak se rozdělují elektrické stroje točivé?
2. Proč se točí elektromotor?
3. Jakými způsoby lze vytvářet točivé magnetické pole?
4. Z jakých částí se skládá elektromotor?
5. Jak vzniká točivý moment motoru?
6. Proč má čtyřpólový stroj poloviční otáčky proti dvoupólovému stroji?
7. K jakým ztrátám dochází v elektromotorech? Jaká je energetická bilance?
8. Jaké údaje se uvádějí na štítku elektromotoru?
9. Jak se zjišťuje směr otáčení elektromotoru?
10. Popište konstrukci trojfázového motoru s kotvou nakrátko.
11. Proč mají asynchronní motory skluz?
12. Jaký je přibližně jmenovitý skluz asynchronních motorů?
13. Jak působí kolísání zátěže na skluz asynchronních motorů?
14. Vysvětlete pojmy rozběhový moment, moment zvratu a sedlový moment.
15. Vysvětlete proč při spojení do trojúhelníku prochází motorem trojnásobek proudu než při spojení do hvězdy a zároveň je třikrát vyšší moment i výkon motoru.
16. Vysvětlete princip činnosti rotoru s hlubokými drážkami.
17. Proč jsou upřednostňovány hlubokodrážkové rotory před rotory s jednoduchou klecí?
18. Při jakém zatížení mají asynchronní motory výhodné provozní vlastnosti?

## 2.1. Popis a vlastnosti elektrických strojů točivých

### 2.1.1. Rozdělení elektrických strojů točivých

Elektrické točivé stroje jsou zařízení, která jsou schopna přeměňovat elektrickou energii v mechanickou (elektromotory) nebo j naopak z mechanické energie vyrábět (generátory). Podle druhu použitého proudu rozdělujeme elektrické stroje na střídavé a stejnosměrné.

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. Střídavé elektrické stroje rozdělujeme podle vztahu mezi rychlostí otáčení a kmitočtem napájecího napětí na synchronní a asynchronní.

U synchronních strojů je rychlost otáčení přímo závislá na napájecím kmitočtu, přičemž platí:

$$n = n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad [\text{min}^{-1}], \quad (1)$$

kde:

$f$  ... kmitočet napětí elektrického stroje [Hz],

$n$  ... rychlost otáčení stroje [ $\text{min}^{-1}$ ],

$n_s$  ... synchronní rychlost otáčení stroje [ $\text{min}^{-1}$ ],

$p$  ... počet pólových dvojic (pólů) stroje [-].

Synchronní generátory, které vyrábějí střídavý proud, nazýváme alternátory.

*Příklad:*

Jaké jsou otáčky u synchronních strojů, které jsou vyrobeny jako dvoupólové ( $2p = 2$ ), Čtyřpólové ( $2p = 4$ ) a šestipólové ( $2p = 6$ ), jestliže uvažujeme kmitočet napájecího napětí 50 Hz nebo 60 Hz?

$2p = 2$

a) pro kmitočet  $f = 50$  Hz:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 3\,000 \text{ min}^{-1}$$

b) pro kmitočet  $f = 60$  Hz:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 60}{2} = 3\,600 \text{ min}^{-1}$$

*Poznámka:*

Kmitočet napětí nebyl použit samoučelně. Ve světě jsou rozšířeny především tyto dva kmitočty napájecích napětí sítě, přičemž s oběma se může čtenář ve své praxi setkávat.

Jestliže je rychlost otáčení u střídavého elektrického stroje jiná než synchronní, mluvíme o asynchronních strojích. Asynchronní stroje mají rychlost otáčení při zatížení nižší o skluz, který je vyjádřen:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad [-], \quad \text{kde: } n_s - n \dots \text{ skluzová rychlost otáčení } [\text{min}^{-1}].$$

Souhrnně lze potom psát:

	$f = 50 \text{ Hz}$	$f = 60 \text{ Hz}$
$2p = 2$	$3\,000 \text{ min}^{-1}$	$3\,600 \text{ min}^{-1}$
$2p = 4$	$1\,500 \text{ min}^{-1}$	$1\,800 \text{ min}^{-1}$
$2p = 6$	$1\,000 \text{ min}^{-1}$	$1\,200 \text{ min}^{-1}$

Pro rychlost otáčení asynchronního stroje potom platí:

$$n = n_s (1 - s) \quad [\text{min}^{-1}].$$

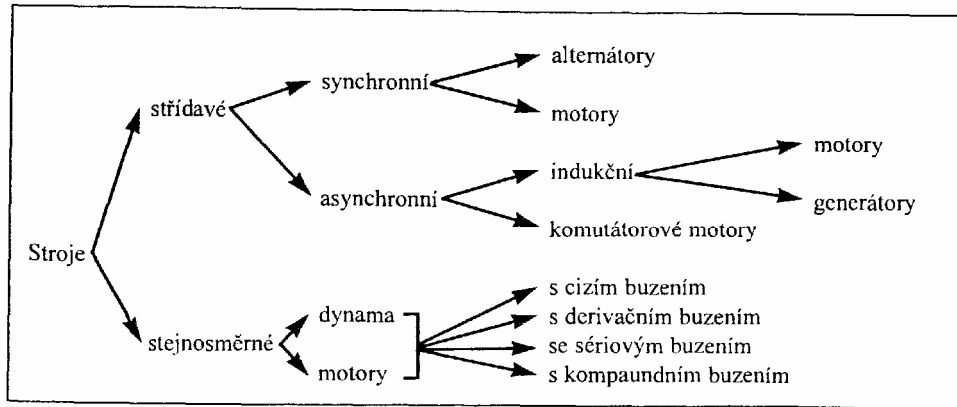
Asynchronní stroje můžeme dále rozdělit na indukční a komutátorové.

U indukčních strojů se přenáší elektrická energie ze statoru do rotoru, pomocí elektromagnetické indukce, u komutátorových strojů je elektrická energie většinou do statoru i rotoru přivedena vedením.

Poznámka:

V současnosti se název asynchronní komutátorový stroj nepoužívá. Mluvíme-li tedy o asynchronním stroji, máme na mysli motor nebo generátor.

Stejnoseměrné točivé stroje dělíme podle přeměňování energie na elektromotory a generátory, které však v případě, kdy vyrábějí stejnosměrný proud, nazýváme dynama. Podle druhu buzení rozeznáváme stroje s cizím, derivačním, sériovým a kompaundním vinutím. Závěrem můžeme tedy elektrické točivé stroje rozdělit podle obr. 1.



Obr. 1 Základní rozdělení elektrických točivých strojů

## 2.1.2. Asynchronní indukční stroje

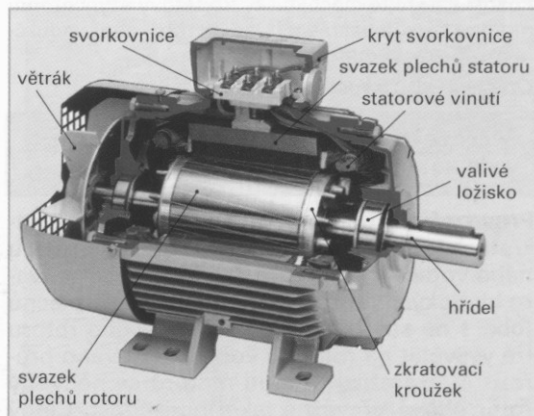
### 2.1.2.1. Popis asynchronních motorů

Asynchronní motory tvoří převážnou část všech motorů používaných v průmyslu. Vyrábějí se buď **jednofázové, nebo trojfázové**. Vyznačují se **konstrukční jednoduchostí a provozní spolehlivostí**. Motory, zejména nižších výkonů, nevyžadují kvalifikovanou obsluhu. **Otáčky motorů jsou při proměnlivém zatížení téměř konstantní**. Asynchronní motory se vyrábějí od výkonu zlomku wattů do výkonů několika desítek megawattů.

Dříve se uplatňovaly především ve všech odvětvích průmyslu, kde se nevyžadovala regulace rychlosti otáčení. S rozvojem výkonové elektroniky byla překonána i tato nevýhoda a tak v dnešní době nejsou výjimkou asynchronní stroje napájené z elektrických měničů kmitočtu.

**Hlavní části trojfázového asynchronního motoru tvoří stator, rotor a ložiskové štíty**. Ve statorové košce je zalisován **statorový svazek**. Statorová kostra je většinou z 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 také z elektrotechnických plechů, je u menších strojů nalisován přímo na hřídel motoru, u větších strojů se lisuje nalité nebo svařované hvězdice, jenž jsou naklínované na hřídeli.**



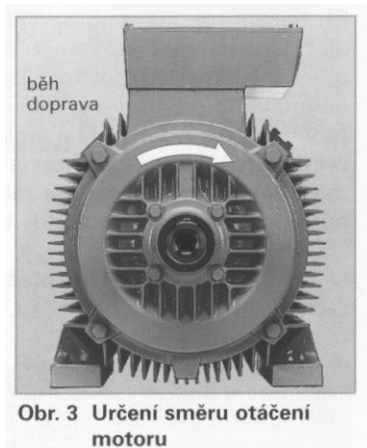
Obr. 1 Trojfázový motor s kotvou nakrátko

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 vznikne najednou odlitím roztaveného hliníku do formy s vloženým rotorovým svazkem.**

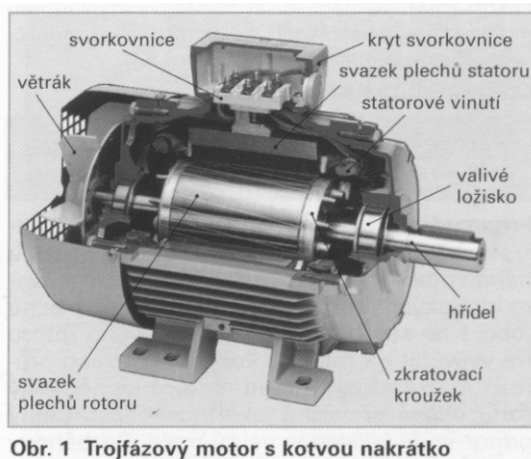
Trojfázové motory s kroužkovou kotvou mají v rotorových drážkách uloženo trojfázové vinutí, jehož konce jsou připojeny ke třem kroužkům

Kroužky jsou izolovaně nasazeny na hřídel motoru.

Na kroužky dosedají kartáče, k nimž se připojuje zařízení ke spouštění nebo regulaci otáček. Na hřídeli jsou nasazena valivá ložiska a celý rotor je uložen v ložiskových štítech. Štít, na jehož straně je volný konec hřídele, nazýváme zadní. Na kostře motoru je buď odlita nebo připevněna svorkovnice, do níž jsou vedeny konce statorového vinutí. V případě kroužkového motoru bývá většinou ještě zvláštní svorkovnice pro vyvedení rotorového vinutí. Hlavní konstrukční části asynchronního trojfázového motoru jsou uvedeny na obr. 1.



Obr. 3 Určení směru otáčení motoru



Obr. 1 Trojfázový motor s kotvou nakrátko

### 2.1.2.2. Směr otáčení stroje

Směr otáčení stroje se udává při pohledu ze strany vyvedené ho hřídele (obr. 3).

Směr otáčení ve smyslu hodinových ručiček ze strany hřídele je považován za směr doprava, opačný směr za směr doleva.

Při oboustranném vyvedení hřídele je rozhodující pohled ze strany hlavního hřídele, tj. hřídele většího průměru. Při stejných průměrech je za hlavní hřídel považován konec hřídele na straně protilehlé ventilátoru, kolektoru nebo sběrným kroužkům.

### 2.1.2.3. Funkce asynchronního motoru

#### 2.1.2.3.1. Vznik točivého momentu motoru

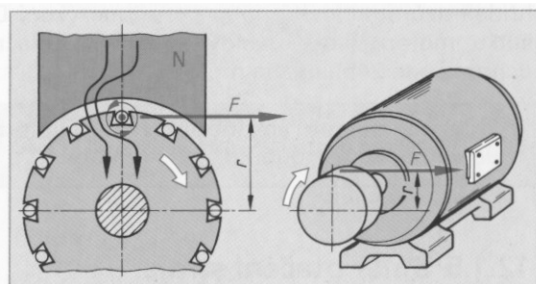
Jak již bylo uvedeno dříve, přenáší se u indukčních strojů elektrická energie ze statoru do rotoru přes vzduchovou mezeru pomocí elektromagnetické indukce. Velice jednoduše lze vznik točivého momentu motoru popsat takto:

Napájíme-li trojfázové vinutí asynchronního motoru ze střídavé trojfázové sítě, vytvoří se v něm točivé magnetické pole. Poněvadž popis vzniku točivého magnetického pole není předmětem této kapitoly omezíme se pouze na konstatování že toto pole má velikost, nemění se s časem, v prostoru se však otáčí synchronní rychlostí podle známého vztahu (1):

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

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. Tento moment je úměrný magnetickému statorovému toku  $\Phi$  a rotorovému proudu  $I_2$ .



Obr. 2 Vznik točivého momentu na rotoru a na řemenici motoru

Poznámka:

Kdybychom otáčeli rotorem stejnou rychlostí jakou má elektrické magnetické pole (synchronní rychlostí), nemohlo by se podle indukčního zákona indukovat v rotoru žádné napětí, rotorem by neprocházel žádný proud a na vodiče rotoru by nepůsobily žádné síly - nevznikl by točivý moment motoru. *To je vysvětlení, proč se musí rotory asynchronních strojů otáčet pomaleji než točivé pole.* Toto zpoždění se nazývá skluz.

### 2.1.2.3.2. Počet pólů

Rychlost otáčení závisí na počtu pólů stroje. V nejjednodušším případě si lze u dvoupólového ( $2p = 2$ ,  $p = 1$ ) představit satorové vinutí jako tři cívky, které jsou ve satorových drážkách rozdělené po  $120^\circ$ . Spojíme-li tyto tři cívky (do hvězdy nebo do trojúhelníku) a napájíme je trojfázovým napětím, vytvoří se v každé cínce pulzující napětí, které je proti ostatním posunuto o  $120^\circ$ . Amplitudy těchto tří pulzujících napětí po sobě následují vždy po jedné třetině délky kmitu napájecího proudu. Složením těchto tří pulzujících polí vznikne výsledné točivé pole, jenž se ve satoru otáčí. V našem případě se toto pole otočí jedenkrát za dobu jednoho kmitu střídavého proudu. Jestliže navineme stroj tak, aby každá fáze měla na obvodu satorového svazku dvě cívky (pro trojfázové vinutí bude tedy 6 cívek), vznikne čtyřpólový stroj ( $2p = 4$ ,  $p = 2$ ). Při připojení trojfázového napětí se pole otočí pouze o jednu polovinu za dobu jednoho kmitu střídavého proudu. Jinak řečeno, na jednu otáčku trojfázového stroje jsou potřeba 2 kmitu střídavého proudu. *To je vysvětlení, proč má čtyřpólový stroj poloviční otáčky proti dvoupólovému stroji.* Jestliže bude napájecí kmitočet  $f_1$ , potom tedy bude u dvoupólového stroje mít točivé magnetické pole, otáček za vteřinu, tj.  $(60 \cdot f_1)$  otáček za minutu. Obdobně u čtyřpólového stroje bude mít točivé pole

$$\frac{f_1}{2} \text{ otáček za vteřinu a tedy } \frac{60 \cdot f_1}{2} \text{ otáček za minutu.}$$

Odtud vyplývá již dříve uvedený vztah (1) pro synchronní rychlost otáčení:

$$n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p} [\text{min}^{-1}].$$

### 2.1.2.3.3. Skluz

Rozdíl mezi synchronní rychlostí (rychlostí otáčení točivého magnetického pole)  $n_s$  a rychlostí otáčení rotoru nazýváme skluzovou rychlostí otáčení. Pro poměrné srovnání jednotlivých druhů a velikostí asynchronních strojů nám slouží tzv. skluz, který je vyjádřen rovnicí (2) nebo v procentech:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 [\%]. \quad (4)$$

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

Z popisu funkce vyplývá, že při připojení napájení satorového vinutí se indukuje do rotoru napětí o kmitočtu  $f_2 = f_1$ . Při rozběhu má rotor stále vzrůstající otáčky, čímž se neustále snižuje rozdíl mezi otáčením rotoru a točivého pole. Tím dochází ke snižování rotorového kmitočtu až na výslednou hodnotu:

$$f_2 = \frac{p}{60} (n_s - n) = \frac{p}{60} n_s \cdot s = s \cdot f_1 [\text{Hz}]. \quad (5)$$

Z tohoto vztahu vyplývá:

- při stojícím rotoru  $n = 0$  je  $f_2 = f_1$  a skluz  $s = 1$ ,
- při synchronní rychlosti rotoru  $n = n_s$  je  $f_2 = 0$  a skluz  $s = 0$ .

Závislost rotorového kmitočtu na rychlosti otáčení je na obr. 3.

Příklad:

Jaký je skluz a kmitočet rotoru u motoru, který má tyto šítkové údaje:

$P = 300 \text{ kW}$ ,  $U = 500 \text{ V}$ ,  $I = 600 \text{ A}$ ,  $n = 2970 \text{ min}^{-1}$ ,  $\cos \varphi = 0,8$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $2p = 2?$



$$n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3\,000 \text{ min}^{-1},$$

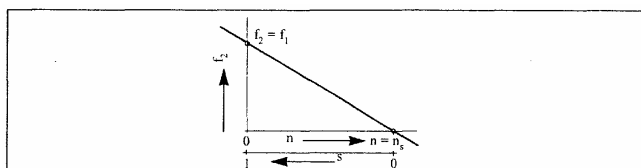
$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 = \frac{3\,000 - 2\,970}{3\,000} \cdot 100 = 1\%,$$

$$f_2 = s \cdot f_1 = 0,01 \cdot 50 = 0,5 \text{ Hz}.$$

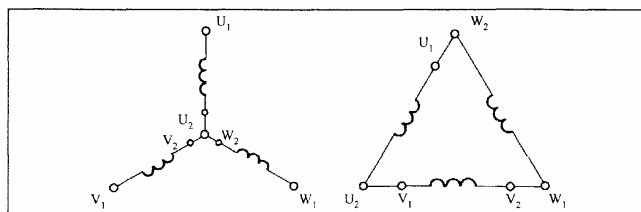
#### 2.1.2.4. Základní vztahy a definice

##### 2.1.2.4.1. Zapojení statorového vinutí

Jestliže se statorové vinutí skládá ze tří vzájemně pootočených fází o  $120^\circ$  a na svorkovnici stroje máme vyvedeno 6 konců, můžeme toto vinutí zapojit **do hvězdy nebo do trojúhelníku** (obr. 4).



Obr. 3 Závislost rotorového kmitočtu na rychlosti otáčení



Obr. 4 Spojení vinutí trojfázového asynchronního motoru

Při **spojení do hvězdy** spojíme všechny začátky (nebo konce) vinutí do uzlu a na protilehlé konce přivedeme trojfázové síťové napětí. Označení tohoto zapojení je Y nebo Y.

Při **spojení do trojúhelníku** spojíme začátek každé fáze na konec fáze předcházející, přičemž je potřeba dodržet sled fází (tj. zapojovat fáze za sebou tak, jak jsou postupně navinuty ve stroji). Označení tohoto spojení je D nebo Δ.

Poznámka:

Jestliže vytvoříme u zapojení do hvězdy uzel jednou na koncích vinutí a podruhé na jejich začátcích, zůstane směr otáčení motoru stejný. Opačný případ nastane, **jestliže u zapojení do trojúhelníku nedodržíme sled fází.** Vysvětlení spočívá v tom, že pouze ve druhém případě **změníme směr točivého magnetického pole v motoru.**

**Pro činný výkon (příkon) ve střídavém obvodu platí vztah:**

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \text{ [W]},$$

kde:

U ... napětí na střídavém obvodu [V],

I ... proud ve střídavém obvodu [A],

$\varphi$  ... fázový posun mezi napětím a proudem.

V našem případě je nutno při výpočtu příkonu trojfázového asynchronního motoru uvažovat trojnásobek příkonu jedné fáze. Označíme-li napětí a proudy pro obě zapojení podle obr. 5, můžeme psát:

$$P_D = 3 \cdot U_s \cdot I_f \cdot \cos \varphi_D = 3 \cdot U_s \cdot \frac{I_D}{\sqrt{3}} \cdot \cos \varphi_D = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot I_D \cdot \cos \varphi_D, \quad (7)$$

$$P_Y = 3 \cdot U_f \cdot I_Y \cdot \cos \varphi_Y = 3 \cdot \frac{U_s}{\sqrt{3}} \cdot I_Y \cdot \cos \varphi_Y = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot I_Y \cdot \cos \varphi_Y. \quad (8)$$

Označíme-li impedanci každé fáze Z, platí, že:

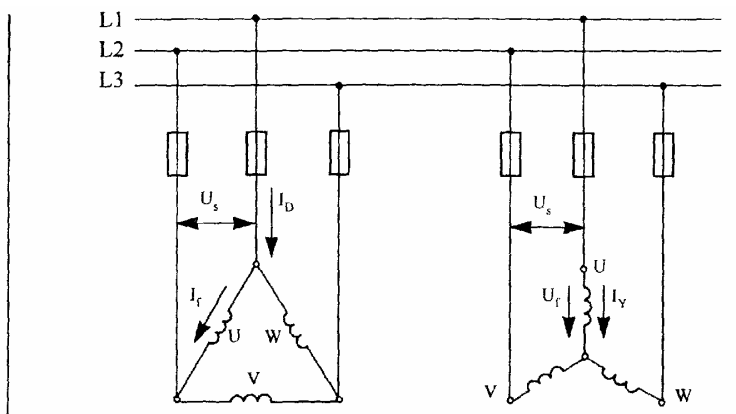
$$I_D = \sqrt{3} \cdot I_f = \sqrt{3} \cdot \frac{U_s}{Z}, \quad (9)$$

$$I_Y = \frac{U_f}{Z} = \frac{U_s}{\sqrt{3} \cdot Z}. \quad (10)$$

Potom poměr **příkonu při zapojení do trojúhelníku a příkonu při zapojení do hvězdy** za předpokladu, že  $\cos \varphi_D = \cos \varphi_Y$  bude:

$$\frac{P_D}{P_Y} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_s \cdot I_D}{\sqrt{3} \cdot U_s \cdot I_Y} = \frac{\frac{\sqrt{3} \cdot U_s}{Z}}{\frac{U_s}{\sqrt{3} \cdot Z}} = 3. \quad (11)$$

Z obr. 5 a z uvedeného výpočtu je vidět, že při spojení do trojúhelníku prochází motorem trojnásobek proudu než při spojení do hvězdy a zároveň je třikrát vyšší moment i výkon motoru. Záběrný proud i příkonový náraz však činí problémy při spouštění motoru, a proto se zde jako jedno z možných řešení používá rozběh motoru při spojení do hvězdy.



Obr. 5 Napěťové a proudové poměry při zapojení motoru D nebo Y

#### 2.1.2.4.2. Změna směru otáčení

Při napájení fází trojfázového asynchronního motoru podle obr. 5 L1 - U, L2 - V, L3 - W následují amplitudy napětí na motoru ve sledu U - V - W. Jestliže zaměníme jakékoliv dva síťové přívody, např. L1 - L3, bude napájení jednotlivých fází vinutí L1 - W, L2 - V, L3 - U a sled amplitud napětí U - W - V. Točivé pole se bude otáčet obráceně a rotor motoru bude mít taktéž opačný směr. Změnu směru otáčení nazýváme reverzace. V případě, že používáme k reverzaci mechanického přepínače, je nutno stroj nejdříve zastavit. Princip reverzace přepínačem je na obr.6.

#### 2.1.2.4.3. Energetická bilance asynchronního motoru

Pro určení výkonu motoru je třeba si uvědomit, jaký je tok činného výkonu - viz obr. 7.

$P_1$  je výkon odebíraný ze sítě (příkon). Ve statorovém vinutí se nám odečtou od příkonu tyto ztráty

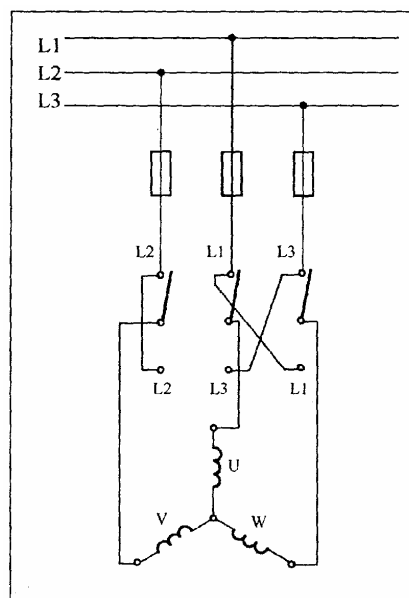
- $\delta P_{Fe1}$  ... ztráty v železe statoru (závislé na napájecím napětí a frekvenci),
- $\delta P_{j1}$  ... ztráty v mědi statorového vinutí (závislé na proudu vinutím),
- $\delta P_d$  ... přídavné (dodatečné) ztráty.

Po odpočtu těchto ztrát dostaneme výkon  $P_\delta$ , což je výkon, který se přenáší elektromagnetickou indukcí ze statoru do rotoru.

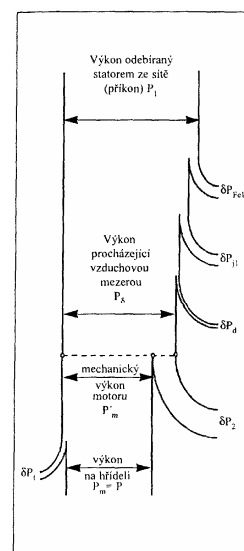
Pro výpočet ztrát v rotoru platí:

$$\delta P_2 = \delta P_{j2} + \delta P_{Fe2} = s \cdot P_\delta \quad (12)$$

Uvědomíme-li si, že při jmenovitém chodu motoru je skluz malý a rotorová frekvence nízká (viz obr. 3), jsou ztráty v železe rotoru zanedbatelné. Po odpočtu ztrát  $\delta P_2$  od výkonu  $P_\delta$  již dostaneme mechanický výkon rotoru  $P_m$ . V tomto výkonu jsou též zahrnuty



Obr. 6 Změna směru otáčení asynchronního trojfázového motoru



Obr. 7 Tok činného výkonu asynchronního motoru



ztráty třením  $\delta P_f$ . Po odečtení těchto ztrát zbývá výkon  $P_m = P$ , který se přenáší na hřídel motoru.

Souhrnně lze tedy psát:

$$\delta P_2 = \delta P_{j2} + \delta P_{Fe2} = s \cdot P\delta, \quad (13)$$

$$P_m' = \delta P_f + P_m = P\delta - s \cdot P\delta = (1 - s) P\delta, \quad (14)$$

$$P_m' + \delta P_2 = P\delta = P_1 - (\delta P_{Fe1} + \delta P_{j1} + \delta P_d), \quad (15)$$

$$\frac{P_m'}{\delta P_2} = \frac{1 - s}{s}, \quad (16)$$

Význam těchto vztahů bude zdůrazněn u kroužkových motorů, u nichž se použije regulace otáček odporem zařazeným do rotorového vinutí. Z energetické bilance můžeme nyní definovat účinnost motoru jako poměr výkonu a příkonu vyjádřený v procentech:

$$\eta = \frac{P_m}{P_1} \cdot 100 [\%]. \quad (17)$$

Potom celkové ztráty v motoru:

$$\delta P = P_1 - P_m \quad [W] \quad (16)$$

$$\delta P = P_{j2} + \delta P_{Fe2} = s \cdot P\delta \quad (12)$$

#### 2.1.2.4.4. Momentová charakteristika

**Momentová charakteristika je závislost momentu na skluzu.** Moment motoru přímo úměrný magnetickému statorovému toku  $\Phi$  a rotorovému proudu  $I_2$ :

$$M = \Phi \cdot I_2.$$

Z mechaniky víme, že mezi výkonem, rychlostí a silou platí, že:

$$P = F \cdot v \quad [W], \quad (19)$$

kde:

F ... síla [N],

v ... rychlost [m/s].

**Pro točivý pohyb platí podobný vztah:**

$$P = M \cdot \omega \quad [W] \quad (20)$$

kde:

M. ... točivý moment [Nm]

$\omega$  ... úhlová rychlost [rad]

Dosadíme-li za úhlovou rychlost:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} \quad [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}], \quad (21)$$

kde:

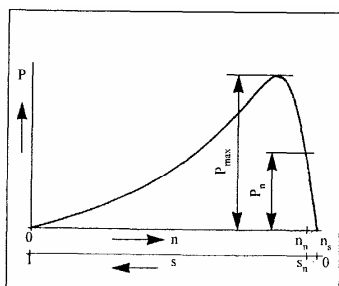
n ... jsou otáčky motoru, pak

$$P = M \cdot \omega = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot M_n = 0,1046 M_n \quad [W]. \quad (22)$$

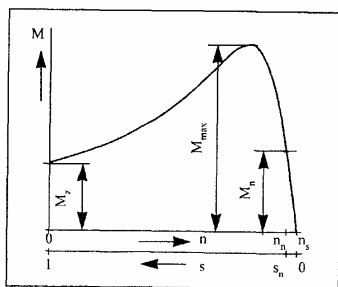
Vyjádříme-li z předchozí rovnice moment:

$$M = \frac{P}{\omega} = 9,55 \frac{P}{n} \quad [Nm]. \quad (23)$$

**Závislost výkonu motoru na otáčkách** (skluzu) je na obr. 8, momentová charakteristika pro asynchronní motor je uvedena na obr. 9.



Obr. 8 Závislost výkonu asynchronního motoru na otáčkách



Obr. 9 Momentová charakteristika asynchronního motoru

Ze vztahu pro otáčky asynchronního motoru (rovnice 3) vyplývá, že s rostoucím skluzem tyto otáčky klesají. Skluz se mění se zatížením podle obr.8. Při synchronní rychlosti  $n$  ( $s = 0$ ) by se točivý moment rovnal nule (na hřídeli rotoru by se nepředával žádný výkon). Při chodu naprázdno se blíží otáčky motoru synchronním otáčkám, a proto je výkon na hřídeli motoru malý. Při určitém skluzu má křivka svůj vrchol: při tomto skluzu je výkon maximální ( $P_{\max}$ ). Maximální výkon je obvykle 1,6 až 2, násobkem jmenovitého výkonu  $P_n$ .

Z křivky je dále vidět, že při dalším zatěžování by prudce klesal výkon na hřídeli motoru, přičemž vlivem ztrát v rotoru (zvyšuje se rotorová frekvence  $f_2$ ) by se zvětšily satorové proudy a došlo by k přehřívání motoru. Momentová charakteristika (obr. 9) je v obdobném vztahu ke skluzu jako výkon na hřídeli. Při chodu naprázdno protéká rotorem malý proud, a proto je malý i točivý moment. Při synchronních otáčkách by byl (obdobně jako výkon na hřídeli motoru) točivý moment roven nule. Maximální hodnoty točivého momentu dosáhne motor při největším součinu magnetického toku a rotorového proudu. Tento maximální moment  $M_{\max}$ , nazýváme moment zvratu a bývá v rozsahu (1,75 až 2,5)  $M_n$ . Aby nemohlo dojít při změně zatěžovacího momentu k překročení momentu zvratu  $M_{\max}$  je pro asynchronní motory v normě definována tzv. momentová přetížitelnost  $p_m$ :

$$p_m = \frac{M_{\max}}{M_n} = \frac{\text{moment zvratu}}{\text{jmenovitý moment}} \quad [-], \quad (24)$$

kteřá má být  $\geq 1,6$ .

**Záběrný moment**  $M_z$  může být i větší než je moment jmenovitý  $M_n$ . U normálních trojfázových asynchronních motorů bývá záběrný moment podle počtu pólů a provedení kotvy v rozsahu (1 až 2)  $M_n$ .

Celou momentovou charakteristiku můžeme rozdělit z hlediska zatížení motoru na dvě části. Oblast od synchronních otáček  $n_s$  ( $s = 0$ ) do oblasti momentu zvratu  $M_z$  nazýváme **stabilní částí momentové charakteristiky**. Oblast od momentu zvratu  $M_{\max}$  do nulových otáček ( $s = 1$ ) nazýváme **labilní částí momentové charakteristiky**. V které části momentové charakteristiky se pohybujeme, určíme takto:

*stabilní část* - se zvětšeným zatížením vzroste moment motoru, i když se zvětší skluz motoru,

*labilní část* - se zvětšeným zatížením vzroste skluz motoru, avšak moment poklesne. Při dalším zvýšení zatížení se motor zastaví. Pokud by nedošlo k jeho odpojení, byl by motor vlivem velkých ztrát zničen. V této oblasti nemůže asynchronní motor pracovat, poněvadž vlivem změny zatížení může dojít buď k jeho zastavení, nebo při odlehčení k přechodu na stabilní část momentové charakteristiky.

Závěrem je ještě nutno se zmínit o **vlivu napájecího napětí na výkon a moment asynchronního motoru**. Výkon motoru je úměrný součinu satorového napětí a proudu. Při konstantním odporu satorového vinutí je satorový proud přímo úměrný napájecímu napětí, a proto je výkon motoru přímo úměrný druhé mocnině napájecího napětí. Poněvadž je výkon motoru v přímé úměře s momentem, platí stejný vztah i pro moment motoru.

*Příklad:*

*Je dán asynchronní motor:*

$U=400V$ ;  $P\ 3000W$ ;  $2p=2$ ;  $s=4,2\%$ ;  $f150Hz$ .

*Jak se změní výkon a moment motoru, sníží-li se napájecí napětí o 10 %?*

*Původní napětí: 400 V*

*Snížené napětí:  $400 \cdot 0,9 = 360\ V$*

*Snížení výkonu a momentu:  $\left(\frac{360}{400}\right)^2 = 0,81$*

*Snížený výkon:  $P' = 3000 \cdot 0,81 = 2430\ W$ , tj. 81 %  $P$ .*

*Původní moment:*

$$M = \frac{P}{\omega} = 9,55 \frac{P}{n}$$

$$n = \frac{60 \cdot f_1}{p} \cdot (1 - s) = \frac{60 \cdot 50}{1} \cdot (1 - 0,042) = 2\ 874\ \text{min}^{-1}$$

$$M = 9,55 \cdot \frac{3\ 000}{2\ 874} = 9,97\ \text{Nm}$$

*Snížený moment:  $M' = 9,97 \cdot 0,81 = 8,07\ \text{Nm}$ ; tj. 81 %  $M$ .*

#### 2.1.2.4.5. Regulace otáček

Jednoduchost asynchronních strojů je předurčuje k použití v širokém rozsahu. Jak vyplynulo z předešlé kapitoly, vyznačují se asynchronní motory stálou rychlostí otáčení (zanedbáme-li skluz). Protože se v některých průmyslových aplikacích vyžaduje skoková nebo plynulá **regulace otáček**, bylo třeba hledat způsoby, jak toho dosáhnout. Ze vztahu (2) pro asynchronní motory:

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

odvodit rovnici (3):

$$n = n_s \cdot (1 - s).$$

Dosazením za synchronní otáčky dostaneme konečný vztah:

$$n = \frac{60 \cdot f_1}{p} \cdot (1 - s). \quad (25)$$

Z tohoto vztahu vyplývá, že otáčky asynchronního motoru můžeme regulovat:

- měnou počtu pólů,
- změnou skluzu

Jednotlivé druhy regulace budou popsány v dalších kapitolách.

#### 2.1.3. Trojfázový asynchronní motor nakrátko

Asynchronní motor nakrátko je vzhledem ke své jednoduchosti nejrozšířenějším elektromotorem. Jeho název je odvozen od konstrukce rotoru.

Vinutí rotoru nakrátko je provedeno z hliníkových nebo měděných tyčí, které jsou uloženy v rotorových drážkách. Na obou stranách jsou tyče spojeny tzv. *kruhy nakrátko*. Kdybychom toto vinutí vyjmuli bez poškození z rotoru, viděli bychom, že tvoří klec. Proto se někdy rotory nakrátko nazývají *klecové rotory*.

##### 2.1.3.1. Spouštění asynchronního motoru nakrátko

Při připojení napájecího napětí na motor je nejdříve rotor v klidu ( $n = 0$ ,  $s = 1$ ). Podle známého vztahu (5) je rotorový kmitočet roven kmitočtu statoru a motor se v tomto okamžiku chová jako transformátor. Poněvadž však jeho sekundární vinutí (klec) je spojeno nakrátko, je proudový náraz (**záběrný proud**) 5 až 8 krát vyšší než jmenovitý proud motoru.

Pro přímé připojování těchto motorů platí:

- Podle elektrotechnických předpisů a norem lze v rozvodných sítích elektráren spouštět přímým připojením na síť motory nakrátko, u nichž nepřekročí ráz při spouštění 22 kVA čemuž odpovídá výkon motoru do 3 kW.
- Má-li odběratel vlastní transformátor, lze klecový motor připojit, není-li výkon motoru vyšší než 50 % výkonu transformátoru.
- Přípustná velikost výkonu spouštěného motoru může být taktéž omezena **dovoleným poklesem napětí** (5 až 10 %), při kterém dochází k poklesu momentu sousedních motorů, případně k blikání žárovek.

Z uvedeného vyplývá nutnost snížit proudový náraz při zapnutí motoru nakrátko. Používají se tyto způsoby spouštění:

- snížení napájecího napětí
- použití rozběhové spojky.
- 

*Spouštění snížením napájecího napětí*

Snížení napájecího napětí lze dosáhnout některým z těchto způsobů:

- vřazením předřadného odporu do statorového vinutí,
- spouštěcím transformátorem,
- **přepínačem hvězda trojúhelník,**
- použitím výkonových elektronických obvodů.

*Zapojení předřadných odporů do statorového vinutí* je uvedeno na obr. 10. Napětí na fázi U bude:  $U_1' = U_1 - U_n$

Záběrný proud potom klesne úměrně s napětím:

$$I_1 = \frac{U_1'}{Z}$$

Záběrový moment poklesne se čtvercem napětí

Tento způsob spouštění se používá velmi málo a jen u malých motorů. Důvodem jsou dvě nevýhody:

- záběrný moment je malý, sotva stačí k rozběhu motoru naprázdno,
- spouštění je ztrátové, část energie při spouštění se v odporech promění v teplo.

Vznikající ztráty ve spouštěcím odporu lze zmenšit použitím spouštěcí tlumivky místo předřadných odporů.

*Spouštění asynchronního motoru spouštěcím transformátorem*

Spouštění asynchronního motoru spouštěcím transformátorem je na obr. 11. Při spouštění se připojí vinutí motoru nejdříve na odbočku s nejnižším napětím a potom následuje postupné přepínání na odbočky s vyšším napětím. Záběrný proud se zmenší se čtvercem napětí

$$\left(\frac{U_1'}{U_1}\right)^2$$

záběrný moment se rovněž sníží v tomto poměru.