12 Elektrické stroje

12.1 Základy

12.1.1 Vytvoření točivého magnetického pole

Otáčením tyčového trvalého magnetu nebo tyčového elektromagnetu kolem vlastního středu vznikne točivé magnetické pole. V generátoru vytváří točivé magnetické pole otáčející se vnitřní rotor (kotva) nebo vnější rotor. V elektromotoru vytváří točivé pole trojfázový proud s fázemi připojenými na soustavy statorových vinutí, pootočených o 120° proti sobě.

Trojfázovým proudem lze vytvořit točivé magnetické pole bez mechanického pohybu.

Statorová vinutí jsou rozložena na obvodu statoru složeného ze statorových (obdoba transformátorových) plechů **(obr. 1)**. Pole se vytváří při průchodu trojfázového proudu vinutími. Protože jsou proudy procházející geometricky posunutými vinutími posunuty časově (fázově o 120°), vzniká točivé magnetické pole **(obr. 2)**.

Točivé magnetické pole vzniká, otáčí-li se magnet, nebo když trojfázový proud protéká kruhově uspořádaným trojfázovým vinutím.

Stroje, které pracují s točivým magnetickým polem, se nazývají elektrické točivé stroje, nebo též **stroje s točivým polem**. Elektromotory využívají točivého pole vytvářeného statorem. Otáčí-li se rotor stejnou rychlostí jako točivé pole statoru, mluvíme o synchronních[1] strojích (motorech). Jsou-li rychlosti otáčení pole a rotoru různé, mluvíme o asynchronních[2] strojích (motorech).

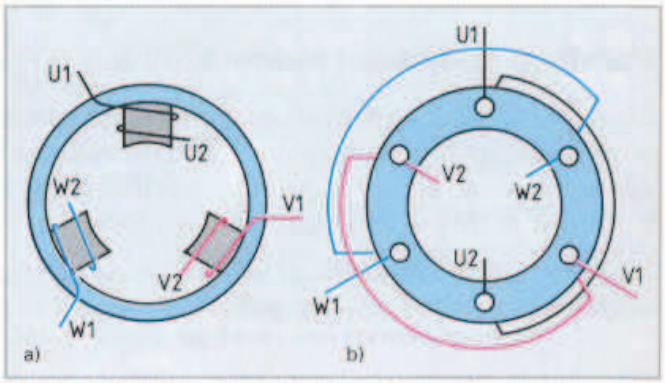
Je-li točivé pole vytvářeno třemi statorovými vinutími odsazenými na obvodu po 120°, je kmitočet otáček pole stejný jako kmitočet sítě. Točivé pole má severní a jižní pól, tedy 1 pólový pár. Je-li na statoru 6 vinutí odsazených od sebe po 60°, zdvojnásobí se počet pólových párů a otáčky (kmitočet) budou poloviční, protože cesta od jednoho pólu (vinutí) k druhému bude poloviční.

Otáčky točivého pole jsou určeny síťovým kmitočtem a počtem pólů trojfázového vinutí.

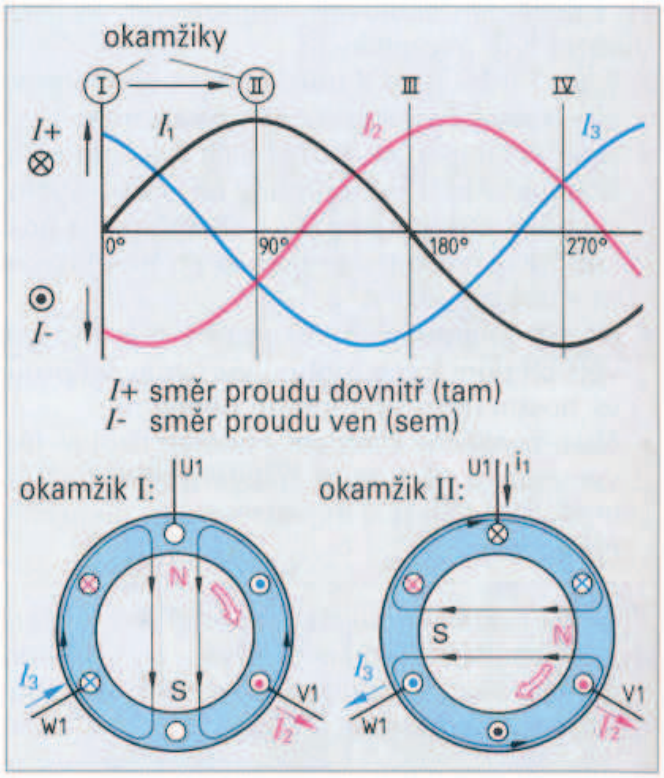
Ve výpočtech bereme v úvahu vždy počet pólových párů (severní a jižní pól tvoří pár).

Otáčky jsou také označovány jako frekvence otáčení.

[1] synchron (řecky) = současný
[2] asynchronní = nesynchronní



Obr. 1 Konstrukce rotoru trojfázového motoru a) se třemi vinutími odsazenými o 120°, b) se svazkem plechů s otvory pro 3 vinutí



Obr. 2 Vznik dvoupólového magnetického pole ve dvou okamžicích I. a II.

$$[n_s] = \frac{1}{s}$$

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

n_s kmitočet (frekvence) otáčení
f kmitočet (proudu)
p počet pólových párů statoru

12.1.2 Výkon a točivý moment

Motory přeměňují odebranou elektrickou energii na mechanickou, generátory opačně přeměňují mechanickou energii na elektrickou.

V elektrických strojích točivých dochází ke ztrátám stejně jako v transformátorech, a to ke **ztrátám v železe** (přemagnetizační hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy) a ke **ztrátám ve vinutí** (v mědi), daným činným odporem drátu. Dále dochází ke ztrátám třením (v ložiscích a na kartáčích) a ke ztrátám při ventilaci. Měřítkem celkových ztrát je účinnost motoru **(obr. 1)**.

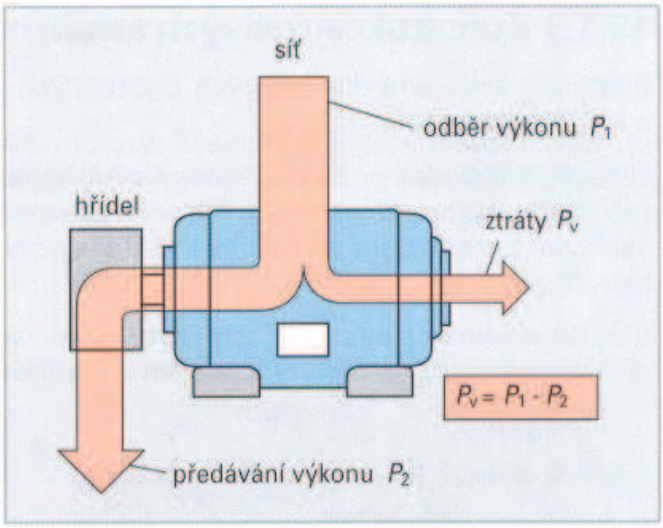
Účinnost je dána poměrem odváděného výkonu a odebíraného výkonu.

Výkon odevzdávaný elektromotorem P_2 lze vypočítat z točivého momentu a otáček. Vstupní výkon P_1 lze měřit jako elektrický výkon odebíraný motorem ze sítě. Točivý moment je u elektromotoru výsledný účinek působení magnetického pole statoru a proudu procházejícího otáčejícím se rotorem. Proud procházející vinutím nebo klecí rotoru vyvolává v magnetickém poli statoru sílu F, která vytváří točivý moment. Měřením síly na obvodu hřídele či řemenice motoru může být zjištěn točivý moment **(obr. 2)**, který může být měřen dynamometrem nebo nějakou brzdou, na které je měřena brzdná energie nebo brzdný výkon.

Dynamometr **(obr. 3)**, nazývaný též brzdový generátor nebo výkonová váha, se skládá ze stejnosměrného generátoru, jehož stator je uložen otočně kolem osy shodné s osou rotoru. Při buzení tohoto statoru vzniká moment brzdící rotor hnaný testovaným motorem a tento moment je možno mechanicky měřit tzv. výkonovou váhou. Energie vznikající při tomto měřeném brzdění se mění na teplo v zatěžovacích odporech. Vyvažováním nastavíme rovnováhu mezi hnacím momentem a zatěžovacím (brzdným) momentem při jmenovitých otáčkách.

Otáčky měříme nějakým otáčkoměrem (např. tachodynamem).

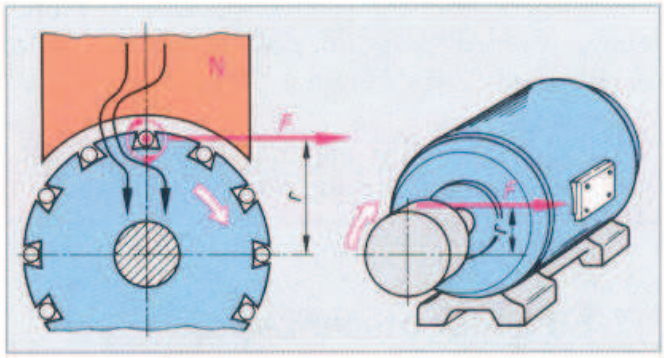
Při jmenovitém výkonu má motor jmenovitý moment při jmenovitých otáčkách.



Obr. 1 Tok výkonu elektromotorem

η účinnost
P_1 příjem výkonu
P_2 výdej výkonu

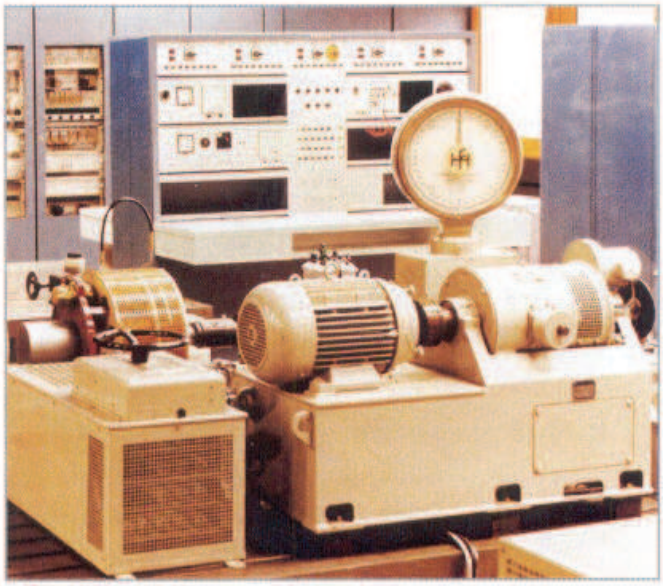
$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$



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

M točivý moment
F síla
r poloměr (rameno síly)

$$M = F \cdot r$$



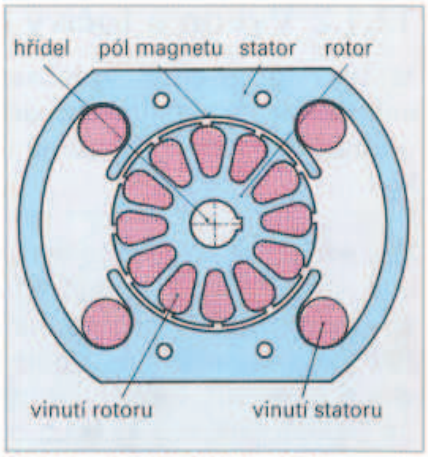
Obr. 3 Zkušebna motorů s dynamometrem

12.1.3 Konstrukce točivých strojů

Elektricky aktivními díly točivých elektrických strojů jsou stator a rotor (kotva), **(obr. 1)**.

U strojů s točivým polem je stator složen z plechů a na obvodu má vinutí. Stator stejnosměrných točivých strojů bývá většinou sestaven z masivního prstencového (železného) jádra a magnetických pólových nástavců.

Vinutí navinutá na svazek plechů rotoru jsou vyvedena na sběrné kroužky nebo na lamely komutátoru (kolektoru).



Obr. 1 Princip konstrukce motoru

12.1.4 Identifikační štítek stroje

Nejdůležitější identifikační údaje a parametry stroje jsou uvedeny na štítku **(obr. 2)**. K těmto údajům patří označení výrobce, typu a druhu stroje, jakož i jmenovité hodnoty napětí, proudu i výkonu pro určený druh provozu. Pokud není druh provozu udán, platí udané parametry pro trvalý provoz. Jmenovité hodnoty se také nazývají provozní hodnoty. Motor odevzdává na hřídeli svůj jmenovitý nebo provozní výkon. Dalšími údaji na štítku motoru jsou jmenovité otáčky, izolační třída a druh ochrany (str. 245) a váha motoru.

Příkon (odebíraný elektrický výkon) motoru lze vypočíst z údajů napětí a proudu na štítku motoru.

výrobce			
typ AD 60			
D - Motor		Nr. 2080	
Δ400	V	166	A
90 kW S3		cos φ 0,89	
1460	/min	50	Hz
Izol.- Kl.B	IP 44	0,6	t
VDE 0530 / 11.95			

Obr. 2 Štítek trojfázového motoru (příklad)

12.1.5 Směr otáčení stroje

Směr otáčení stroje se udává při pohledu ze strany vyvedeného 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.

Trojfázový motor se točí doprava, jsou-li fáze L1, L2, L3 připojeny postupně na svorky U1, V1, W1.

Změny směru otáček motoru lze dosáhnout přehozením dvou fázových přívodů.

Pro trojfázový motor platí

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

P_1	příkon
U	jmenovité napětí
I	jmenovitý proud
$\cos \varphi$	účiník

Obr. 3 Určení směru otáčení motoru

Otázky k opakování

1. **Jakými způsoby lze vytvářet točivé magnetické pole?**
2. **K jakým ztrátám dochází v elektromotorech?**
3. **Jaké údaje se uvádějí na štítku elektromotoru?**
4. **Jak se zjišťuje směr otáčení elektromotoru?**

12.2 Trojfázové motory bez komutátoru

12.2.1 Trojfázové asynchronní motory

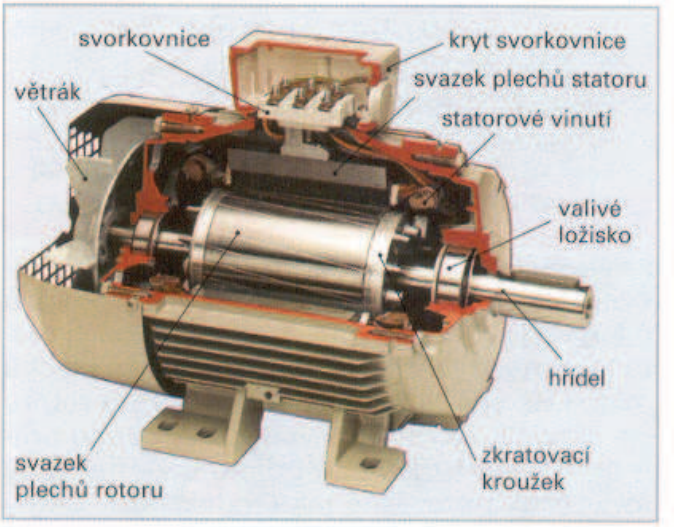
Asynchronní motory jsou nejdůležitější trojfázové motory. Magnetické pole statoru indukuje v rotoru napětí a vzniklý proud pak vyvolá sílu otáčející rotorem. Tyto motory jsou také označovány jako **indukční motory**. Podle konstrukce rotoru se pak rozlišují různé typy asynchronních motorů.

12.2.2 Motory s kotvou nakrátko

Konstrukce. Stator se skládá z nosného tělesa (krytu) motoru, svazku statorových plechů a statorového vinutí **(obr. 1)**. Konce statorového vinutí jsou vyvedeny na svorkovnici.

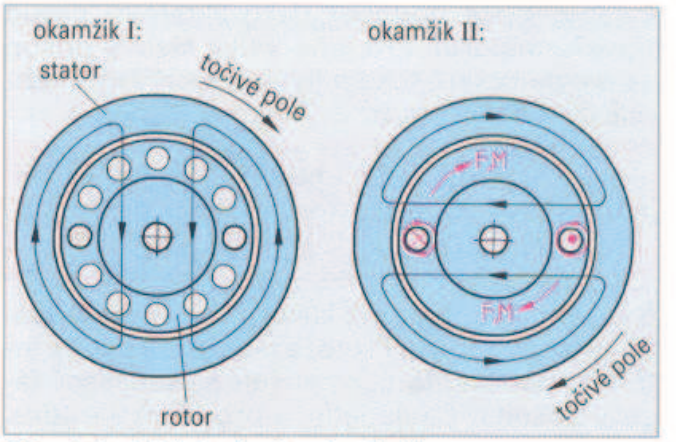
Rotor (kotva) je sestaven z rotorových plechů nasazených ve svazku na hřídeli a z vodičů v drážkách rotoru. Vodiče jsou tvořeny hliníkovými nebo měděnými tyčkami a jsou na čelních stranách svazku rotorových plechů spojeny nakrátko zkratovacími kroužky. Vodivé tyčky spolu se zkratovacími kroužky mají podobu klece (klecový rotor).

Rotor i stator jsou složeny z jednostranně izolovaných elektroplechů. Touto konstrukcí je prakticky zabráněno ztrátám vířivými proudy (jako u transformátorů).



Obr. 1 Trojfázový motor s kotvou nakrátko

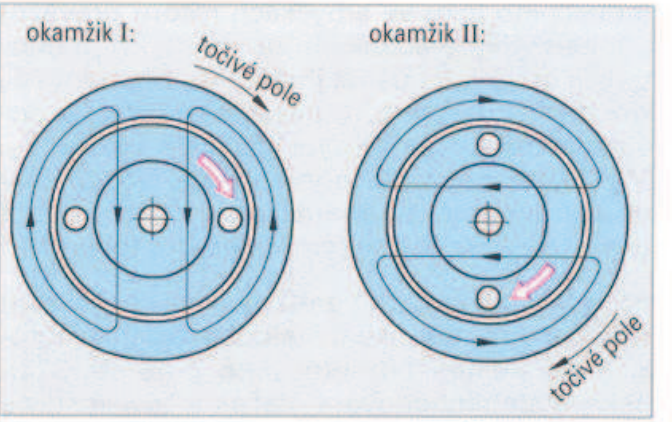
Princip činnosti. Klecový rotor lze považovat za nejjednodušší trojfázové vinutí. V momentu zapnutí se chová klecový rotor jako zkratované sekundární vinutí transformátoru. Točivé pole statoru způsobuje změny magnetického toku ve vodivých smyčkách tvořených vodiči rotoru. Rychlost změn magnetického toku procházejícího vodivými smyčkami stojícího rotoru odpovídá kmitočtu točivého elektromagnetického pole. Indukované napětí vyvolá průtok elektrického proudu klecovým rotorem **(obr. 2)**.



Obr. 2 Indukční působení točivého pole na nehybný rotor

Asynchronní motory jsou indukční motory. Proud v rotoru je vyvolán indukcí.

Podle Lenzova pravidla způsobí magnetické pole indukované proudem v rotoru točivý moment, který otočí rotorem ve směru otáčení točivého pole statoru. Pokud by dosáhly otáčky rotoru otáček točivého pole statoru, klesl by točivý moment na nulu **(obr. 3)**. Točivý moment je úměrný rozdílu otáček rotoru a pole statoru, který nazýváme **skluzové otáčky** asynchronního motoru.



Obr. 3 Neměnný magnetický tok procházející rotorem při synchronních otáčkách

Asynchronní motor potřebuje skluz otáček k indukci proudu v rotoru.

Skluz otáček asynchronních motorů bývá běžně 3% až 8% jmenovitých otáček.

Příklad: Čtyřpólový trojfázový motor má při napájení 50 Hz otáčky 1440/min. Jaký je skluz?

$$n_s = \frac{f}{p} = \frac{50\ \text{Hz}}{2} = 25\ \frac{1}{\text{s}} = 1500\ \text{otáček/min}$$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100\%$$

$$= \frac{1500\ \text{ot./min} - 1440\ \text{ot./min}}{1500\ \text{ot./min}} \cdot 100\% = 4\%$$

Pokus: Zatěžujte mechanicky trojfázový asynchronní motor s kotvou nakrátko (brzděte rotor např. indukční brzdou) a sledujte změny otáček.

Otáčky klesají s rostoucí zátěží.

Skluz otáček asynchronního motoru je závislý na zátěži motoru.

Provozní vlastnosti. Klecový rotor (kotva nakrátko) je tvořena vodiči kruhového průřezu nebo vodiči jiných průřezů odpovídajících tvaru hlubokých drážek svazku rotorových plechů **(obr. 1 na str. 292)**. Chování klecového rotoru lze vysvětlit na rotoru s vodiči kruhového průřezu. V okamžiku zapnutí motoru se nehybný rotor chová převážně jako indukčnost. Činný odpor vodivé klece je velmi malý. Rozběhový proud proto může dosáhnout až desetinásobku jmenovité hodnoty (jako zkratový proud transformátoru). Pro jeho velký fázový posun za magnetickým tokem je však točivý moment malý.

Rotory s kruhovými vodiči mají přes velké rozběhové proudy jen malý rozběhový moment.

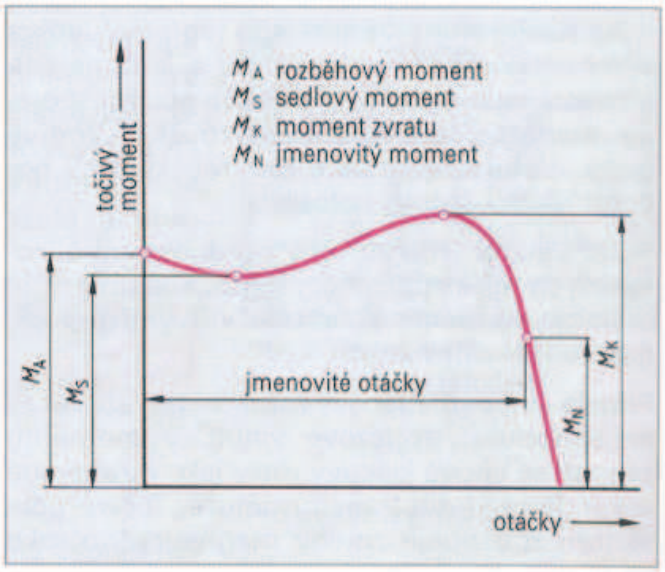
S rostoucími otáčkami klesá indukované napětí i proud v rotoru. Protože také klesá jalový indukční odpor rotoru, zmenšuje se současně fázový posun mezi napětím a proudem v rotoru. **Průběh momentu** v závislosti na otáčkách **(obr. 1)** ukazuje nárůst až do hodnoty M_K **momentu zvratu,** kdy začne pokles rychlosti změn indukčního toku ve smyčkách rotoru převažovat nad vlivy zvětšujícími moment. Při jmenovitých otáčkách působí **jmenovitý moment** M_N (jmenovité zatížení). V nezatíženém stavu dosahuje motor téměř synchronních otáček n_s. V okolí jmenovitého momentu M_N jsou změny skluzu úměrné změnám zatížení ΔM, neboť charakteristika je zde téměř lineární **(obr. 2)**.

Při nárůstu (kolísání) zatížení klesají (kolísají) otáčky málo, tak jako u stejnosměrného motoru s paralelním buzením **(obr. 2 na str. 322)**. Takové stabilní chování otáček v závislosti na zatížení motoru se označuje jako **chování derivačního motoru.**

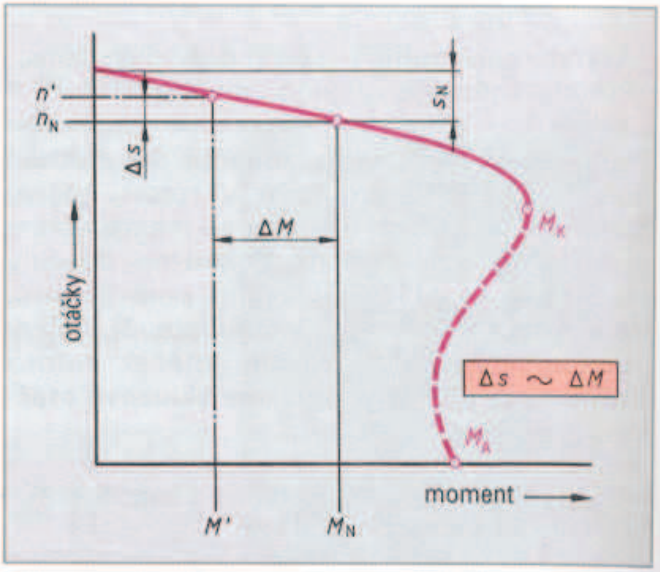
$$\Delta n = n_s - n$$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100\%$$

Δn skluz otáček
n otáčky rotoru
n_s otáčky točivého pole
s relativní skluz



Obr. 1 Charakteristika asynchronního motoru s hlubokodrážkovým rotorem



Obr. 2 Zatěžovací charakteristika asynchronního motoru s kotvou nakrátko

Sedlový moment M_s odpovídá sedlu v momentové charakteristice **(obr. 1)**, tedy nejmenšímu momentu mezi rozběhem a maximální hodnotou momentu M_K. Rozdílným počtem drážek v rotoru a statoru a šikmým nebo stupňovitým uspořádáním tyčových vodičů **(obr. 1, str. 290)** lze docílit stoupající charakteristiky bez sedla.

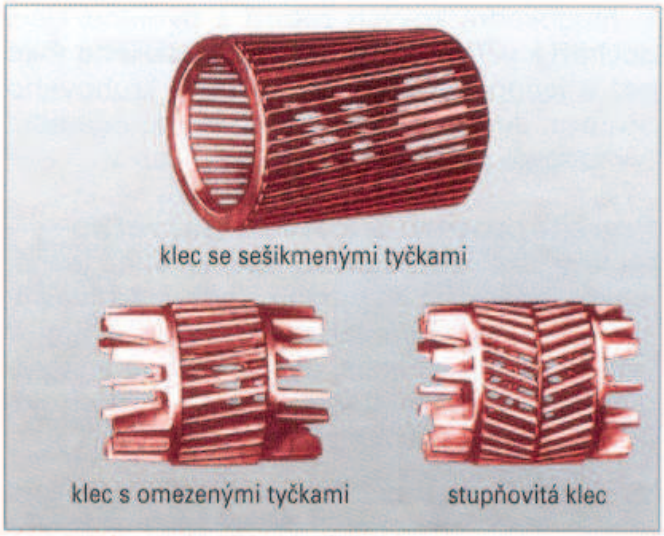
Zvětšení rozběhového momentu při současném zmenšení rozběhového proudu lze dosáhnout použitím materiálů s větším elektrickým odporem na tyčky klece rotoru, např. hliníkových slitin. Při náběhu se tak zvětší činná část impedance rotoru a zmenší se tak fázový posun mezi magnetickým polem statoru a proudem rotoru, takže i přes pokles rozběhového proudu stoupne jeho činná složka.

Pro zmenšení ztrát ve vodičích rotoru při provozu (provozních otáčkách) jsou rotory konstruovány jako hlubokodrážkové, využívající efekt vytlačování proudu do vnějších vodičů s větším odporem při rozběhu.

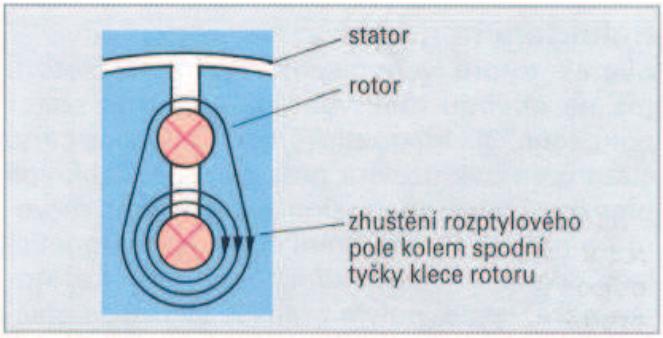
Hlubokodrážkový rotor s dvojitou klecí (rozběhovou a pracovní)

Ke zvýšení odporu klece rotoru při rozběhu lze vytvořit klec s dvojicemi vodivých tyček nad sebou **(obr. 2)** tak, že vnější tyčky mají menší průřez a větší odpor. Indukovaný proud vytváří kolem tyček magnetické pole (obr. 2). Obě rozptylová pole indukují zpětně napětí, která se snaží podle Lenzova pravidla zmenšit původní střídavé proudy v tyčkách. Magnetický tok kolem spodních tyček (bližších ose rotoru) je silnější, přestože se může převážně uzavírat v železe. Zeslabující účinek na proud je proto silnější než ve vnějších tyčkách rotorové klece. Proud je tedy vytlačován do vnějších tyček klece (skinefekt). Při velkých rozběhových proudech je tedy proud v rotorové kleci vytlačen do vnějších vodičů (rozběhové klece) s menším průřezem a větším odporem a rozběhový proud je pak menší **(obr. 3)**, má větší činnou složku a tím menší fázové zpoždění za průběhem magnetického toku statoru a tedy větší silové účinky. Momentová charakteristika **(obr. 4)** je pak při rozběhu příznivější než při jednoduché rotorové kleci s tyčkami kruhového průřezu. Tentýž efekt lze dosáhnout i při jiném tvaru hlubokých drážek (a tomu odpovídajících vysokých vodičů) rotoru **(obr. 1 na str. 292)**. Při rostoucích otáčkách klesá proud ve vodičích rotoru, který pak není přesycen, klesne rozptylový tok a tím i efekt vytlačování proudu na povrch (skinefekt) rotorové klece. Při jmenovitých otáčkách je proudová hustota rovnoměrná v celém průřezu vysokých vodičů rotorové klece, tedy větší část proudu teče silnějšími vodiči pracovní klece.

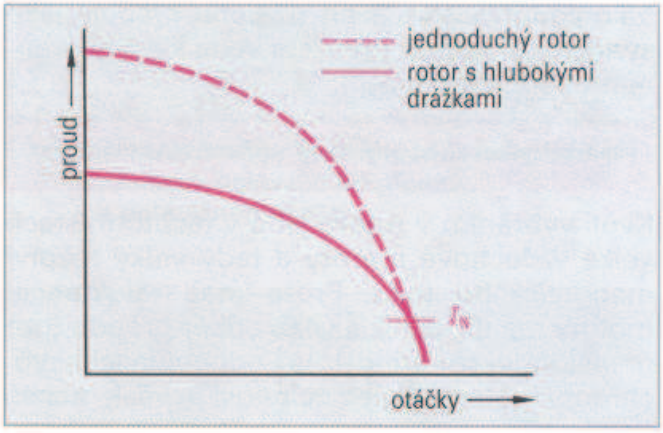
Rotor s hlubokými drážkami má velký rozběhový moment a malý rozběhový proud.



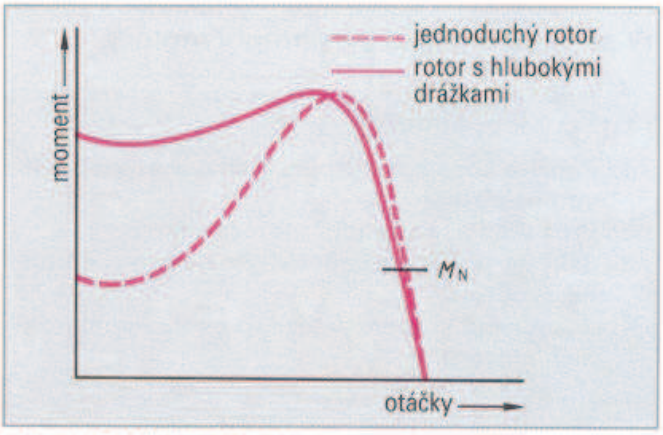
Obr. 1 Provedení klecových rotorů



Obr. 2 Vytlačování proudu (rotor s dvojitou klecí)



Obr. 3 Průběh proudu (odběr)



Obr. 4 Průběh točivého momentu

U hlubokodrážkových rotorů s dvojitou klecí dochází k většímu rozptylu magnetického toku než u jednoduché klece s tyčkami kruhového průřezu. Je zde proto trochu menší účinnost (výkonová) právě tak jako účiník (cos φ).

Použití motorů s kotvou nakrátko

Motory s kotvou nakrátko jsou výrobně levné, lehké, nenáročné na údržbu a neruší rozhlas jiskřením (jako komutátorové motory). Slouží jako pohony výrobních strojů malého a středního výkonu, např. pohony obráběcích strojů, jeřábů, ventilátorů a v zemědělství.

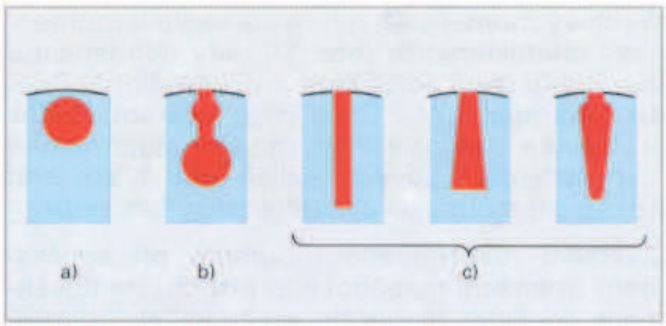
Výhodných vlastností lze využít při zatěžování jmenovitým výkonem, při kterém má motor vysokou účinnost i účiník **(obr. 2)**.

Reluktanční motor

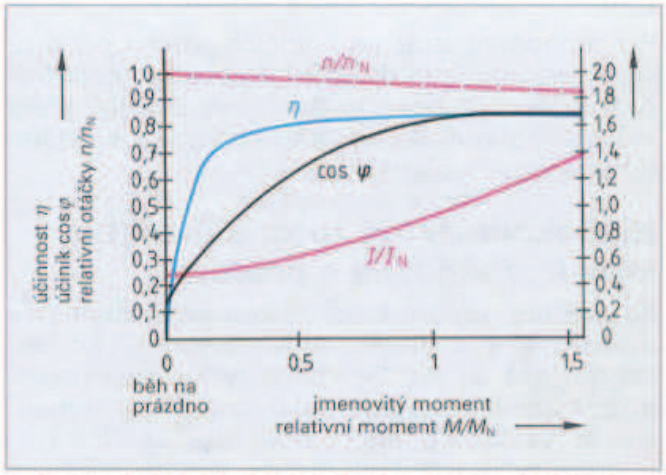
Svazek rotorových plechů klecového rotoru má na obvodu tolik vybrání, kolik má stator pólů **(obr. 3)**. Magnetický tok (indukční čáry) statoru se pak uzavírá přes rotor, a to hlavně přes části oddělené malou vzduchovou mezerou a nikoliv přes vybrání s velkým magnetickým odporem velké vzduchové mezery. Rotor tím získá vlastní póly a brání se skluzu za otáčkami točivého pole statoru. Reluktanční[1] (bránící se – skluzu) motor se rozbíhá jako motor s kotvou nakrátko a po rozběhu pracuje jako synchronní motor. Přetížení vede k asynchronnímu běhu se skluzem.

Reluktanční motory mají synchronní otáčky.

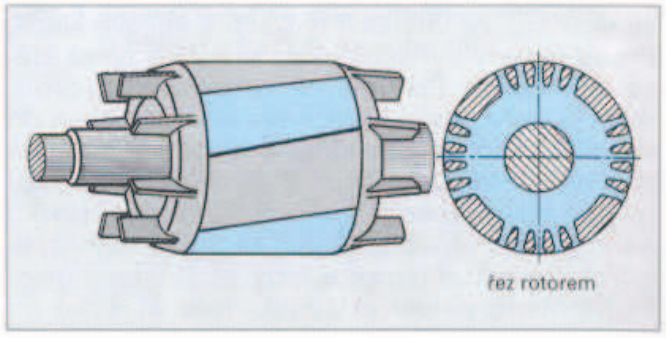
Kvůli vybráním v rotoru jsou v těchto místech velké vzduchové mezery a tedy velký rozptyl magnetického toku. Proto mají reluktanční motory menší účiník a větší odběr proudu (pro menší indukční odpor) než odpovídající asynchronní motory. Jejich účinnost je však menší. Reluktanční motory se používají k pohonu strojů s konstantními otáčkami, např. k pohonu tkalcovských stavů. Malé reluktanční motory se používají jako synchronní motory.



Obr. 1 Tvary drážek v rotorech nakrátko
a) drážky pro kruhové tyče
b) drážky pro dvojitou klec
c) tvary hlubokých drážek



Obr. 2 Typické charakteristiky motorů s kotvou nakrátko, jmenovitých výkonů 2 kW až 5 kW



Obr. 3 Rotor a rotorový plech reluktančního motoru

Otázky k opakování

1. **Popište konstrukci trojfázového motoru s kotvou nakrátko.**
2. **Proč mají asynchronní motory skluz?**
3. **Jaký je přibližně jmenovitý skluz asynchronních motorů?**
4. **Jak působí kolísání zátěže na skluz asynchronních motorů?**
5. **Vysvětlete pojmy rozběhový moment, moment zvratu a sedlový moment.**
6. **Vysvětlete princip činnosti rotoru s hlubokými drážkami.**
7. **Proč jsou upřednostňovány hlubokodrážkové rotory před rotory s jednoduchou klecí?**
8. **Při jakém zatížení mají asynchronní motory výhodné provozní vlastnosti?**

[1] reluctari (lat.) = vzpírat se

12.2.3 Rozběh kotvy nakrátko (statorové spouštění)

Motory s kotvou nakrátko mají na začátku rozběhu velké rozběhové proudy. Pro zabránění rušivému kolísání síťového napětí předpisují rozvodné závody pro motory vyšších výkonů spouštěcí zařízení. Přípustný rozběhový proud musí vyhovovat technickým podmínkám pro připojování zařízení k síti **(viz tabulka)**.

U trojfázových motorů s výkonem nad 5 kW je vyžadován spouštěcí režim omezující rozběhový proud.

Zmenšení velkého rozběhového proudu je u motorů s kotvou nakrátko možné jen zmenšením rozběhového napětí statoru. K tomu se používá statorový rozběhový režim.

Statorové rozběhové režimy zmenšují rozběhový proud snížením napětí statoru.

Výkon a točivý moment motoru jsou úměrné čtverci napětí. Odpovídajícím poměrem se také zmenšuje výkon i moment při zmenšování napětí.

Při statorovém rozběhovém režimu je točivý moment úměrný čtverci statorového napětí.

Je-li motor spouštěn při polovině jmenovitého napětí, má jen čtvrtinu rozběhového momentu. Průběh charakteristik ukazuje, že zde motor nedosáhne při jmenovité zátěži požadovaného momentu **(obr. 1)**.

Statorové rozběhové režimy mohou být používány jen při sníženém zatížení nebo rozběhu motoru bez zatížení.

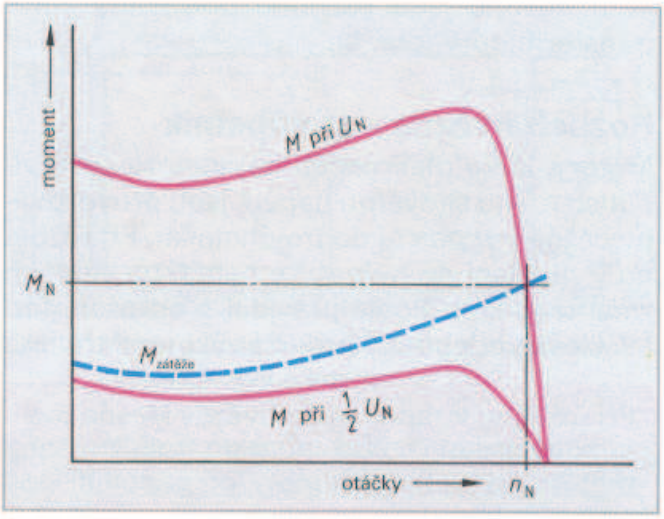
Statorový spouštěč s odpory

Ke zmenšení napětí statoru při rozběhu jsou do přívodů při rozběhu zařazovány omezovací odpory **(obr. 2)**. Tím se zmenší odpovídajícím způsobem rozběhový proud. Pro rozběh motoru zapojeného do hvězdy mohou být odpory připojeny také na výstupní svorky, protože jsou s vinutími i takto v sérii **(obr. 1 na str. 294)**. Mluvíme pak o režimu **hvězdového spouštění**. Při použití předřadných činných odporů dochází k tepelným ztrátám. Pro zabránění vzniku tepelných ztrát jsou používány předřadné cívky, které však zase zhoršují účiník v síti.

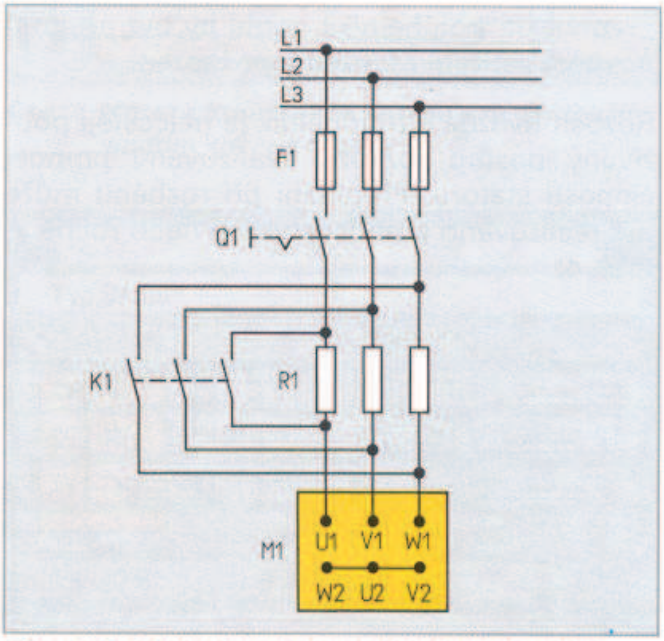
Tabulka: Podmínky připojování motorů do sítě nízkého napětí (do 1000 V)

jednofázové střídavé motory	jmenovitý výkon do 1,4 kW
trojfázové motory	rozběhový proud do 60 A*
motory se zvláštním síťovým zatížením	potřebná opatření jsou stanovena rozvodnou organizací

* není-li rozběhový proud znám, je dosazen osminásobek jmenovitého proudu



Obr. 1 Charakteristiky točivého momentu motoru s kotvou nakrátko při plném a polovičním napětí



Obr. 2 Trojfázový motor s rozběhovými odpory v přívodním vedení

K rozběhu malých motorů s kotvou nakrátko se používá zapojení k měkkému rozběhu tvořené jen jedním odporem **(obr. 2)**. Toto zapojení se používá hlavně pro snížení rozběhového momentu pohonů textilních strojů.

Rozběhové transformátory

Transformátory zmenšují při rozběhu napětí a tím i rozběhový proud motoru. Převodním poměrem transformátoru je tento proud odebíraný ze sítě ještě dále zmenšen. Odebíraný rozběhový proud se tedy zmenšuje úměrně čtverci zmenšení rozběhového napětí.

Rozběhové transformátory jsou používány např. pro motory velkého výkonu. Z ekonomických důvodů jsou většinou používány autotransformátory **(obr. 3)**.

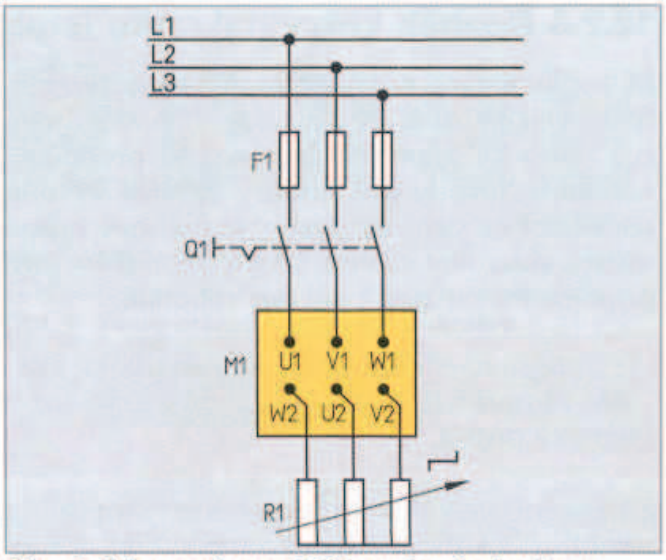
Rozběh hvězda – trojúhelník

Motory, které mají napětí na (statorových) vinutích rovno síťovému napětí, jsou provozovány běžně v zapojení do trojúhelníku. Při rozběhu v zapojení do hvězdy se napětí na vinutích zmenší $\sqrt{3}$ krát. Podle pravidel o sdružení fází tak klesne odebíraný proud i výkon na třetinu.

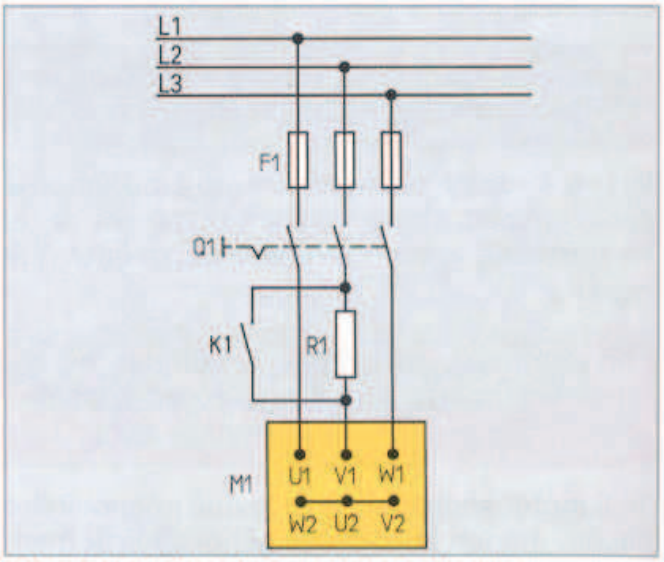
Při rozběhu v zapojení do hvězdy klesne rozběhový proud i točivý moment trojfázového motoru na třetinu hodnoty při zapojení do trojúhelníku.

Rozběh s přepnutím z trojúhelníku na hvězdu se tedy může realizovat jen při malém zatížení motoru. Pokud by motor nebyl při rozběhu přepnut do trojúhelníku, mohl by být při jmenovitém zatížení přetížen a poškozen.

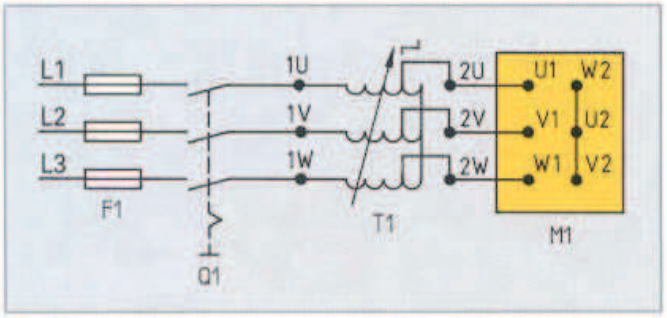
Rozběh hvězda – trojúhelník je nejčastěji používaný postup rozběhu realizovaný pomocí činnosti statoru. Přepínání při rozběhu může být realizováno pomocí stykačů nebo ručně **(obr. 4)**.



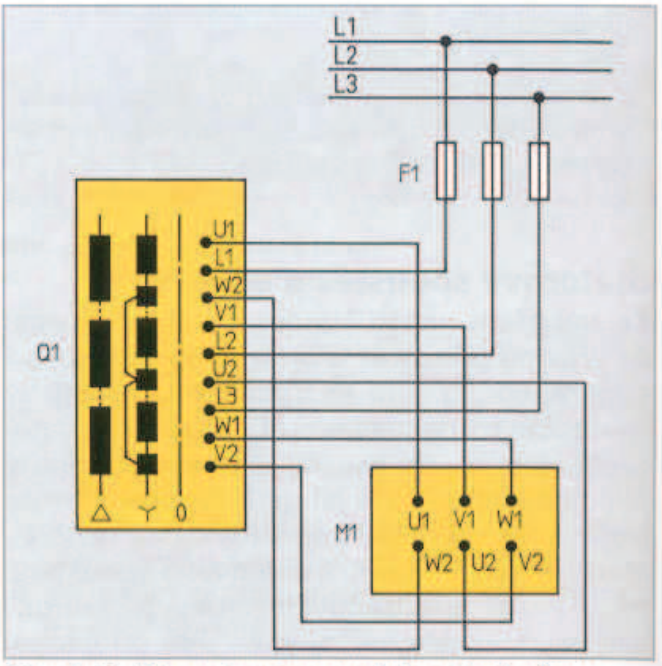
Obr. 1 Odporový spouštěč s nulovým bodem



Obr. 2 Měkký rozběh s jedním odporem



Obr. 3 Trojfázový motor s rozběhovým transformátorem



Obr. 4 Trojfázový motor s ručním přepínačem hvězda – trojúhelník

12.2.4 Motory s kroužkovou kotvou

Konstrukce. Stator motoru s kroužkovou kotvou má stejnou konstrukci jako stator motoru s kotvou nakrátko **(obr. 1)**. Na hřídeli rotoru je svazek rotorových plechů a sběrné kroužky. V drážkách rotorového svazku plechu je uloženo vinutí rotoru. Vinutí rotoru má téměř vždy tři cívky (trojfázové vinutí), které je zapojeno většinou do hvězdy, zřídka do trojúhelníku. Vinutí rotoru je připojeno na tři sběrací kroužky. Připojení na sběrací kroužky je realizováno třemi přítlačnými uhlíkovými kontakty (kartáči). Přes tyto uhlíkové kartáče mohou být zapojeny do obvodu cívek rotoru činné odpory, které slouží k rozběhu nebo regulaci otáček motoru.

Přívody rotoru se třemi cívkami jsou označeny K, L, M **(obr. 2)**.

U motorů velkých výkonů může být rotor navinut jako dvoucívkový. Označení přívodů je pak K, L, Q **(obr. 3)**.

Princip činnosti. Motor s kroužkovou kotvou s kroužky (resp. kartáči) propojenými nakrátko pracuje na stejném principu jako motor s kotvou nakrátko.

Pokus 1: Připojte na dva kroužky (kartáčové sběrače) motoru s kroužkovou kotvou voltmetr a připojte napájení na stator.

Rotor se neotáčí, ale mezi kroužky naměříme napětí.

Při nehybném rotoru působí stator s rotorem jako transformátor, ve kterém působí stator jako primární vinutí a rotor jako sekundární vinutí. Napětí naměřené takto při nehybném rotoru nazýváme **klidové napětí rotoru.**

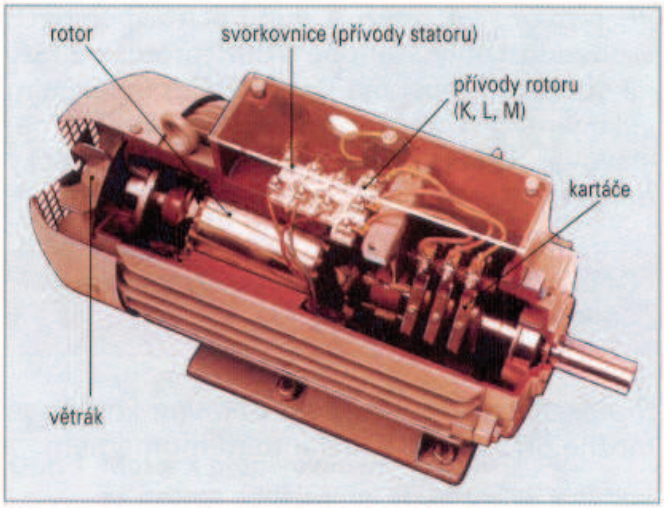
Pokus 2: Propojte dva kroužky (resp. kartáče) přes ampérmetr a jeden z nich spojte nakrátko se zbývajícím třetím kroužkem (kartáčem). Připojte na stator napájení.

Ručka ampérmetru se vychýlí a rotor se roztočí.

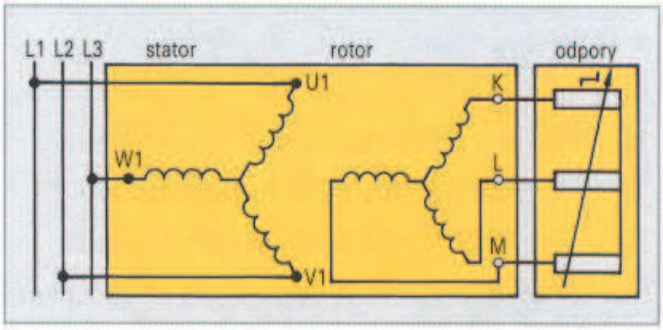
Při nakrátko zapojeném rotoru vyvolá napětí indukované v rotoru proud. Magnetické pole statoru a proud rotoru vyvolají otáčivý moment a roztočí rotor.

Klidové napětí rotoru a klidový proud rotoru jsou udávány na štítku motoru kvůli dimenzování rozběhových odporů **(obr. 4)**.

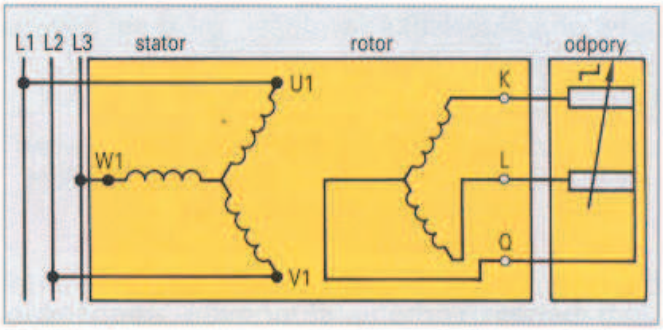
Provoz. Vlastnosti motorů s kroužkovou kotvou jsou při zapojení kotvy nakrátko stejné jako vlastnosti asynchronních motorů s kotvou nakrátko.



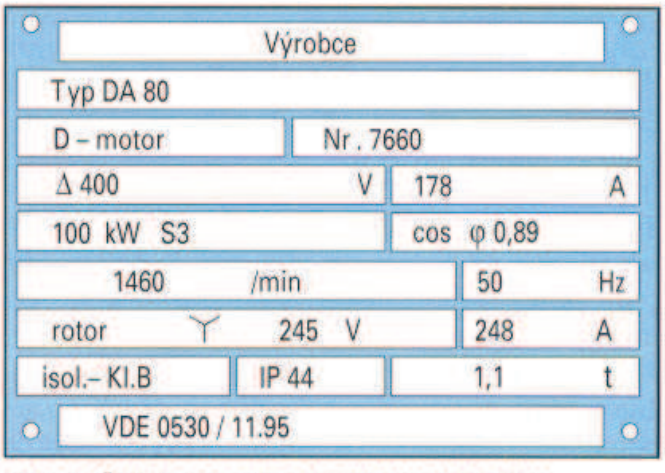
Obr. 1 Motor s kroužkovou kotvou



Obr. 2 Motor s kroužkovou kotvou s trojfázovým vinutím kotvy a odporu



Obr. 3 Motor s kroužkovou kotvou s dvojfázovým vinutím kotvy a odpory



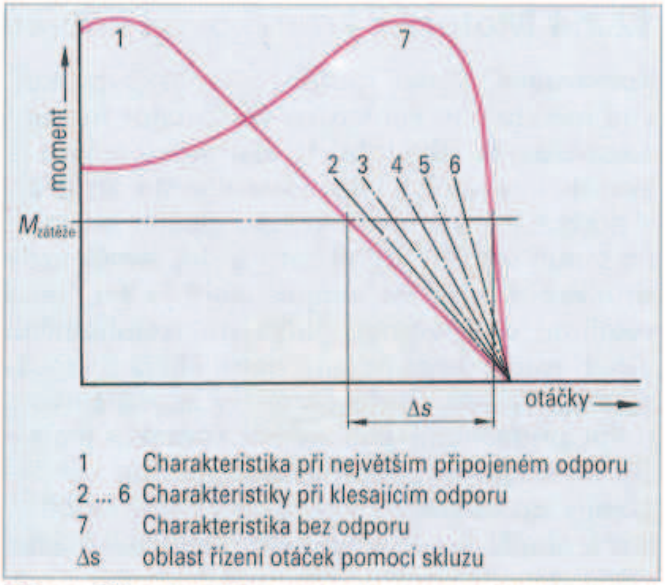
Obr. 4 Štítek motoru s kroužkovou kotvou

Při provozu se zátěží a odporech zapojených v obvodu kotvy stoupne skluz, protože ztráta na odporech musí být kryta větším indukčním výkonem. Je-li možno odpory stupňovitě nastavovat, je tak možno stupňovitě řídit otáčky motoru **(obr. 1)**.

Otáčky motoru s kroužkovou kotvou se řídí odpory v obvodu kotvy.

Řízení otáček motoru s kroužkovou kotvou je možné při zatížení konstantním momentem.

U motorů s kroužkovou kotvou velkých výkonů je snižování otáček pomocí odporů v trvalém provozu nehospodárné pro velké tepelné ztráty.

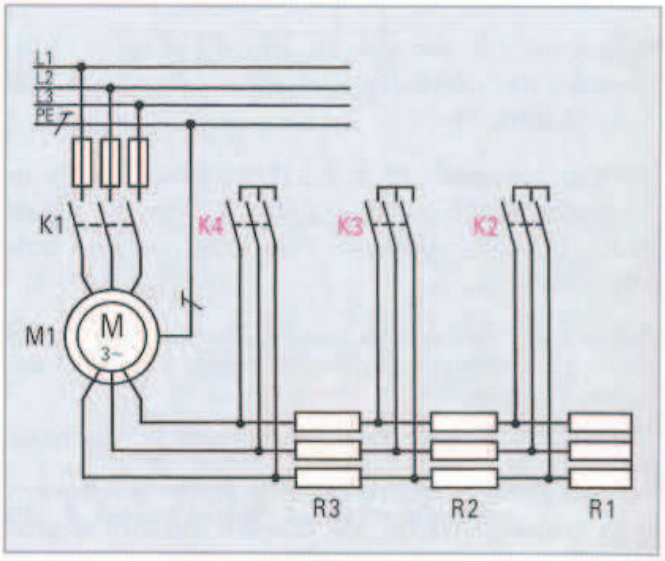


Obr. 1 Řízení otáček motorů s kroužkovou kotvou připojováním odporů do obvodu kotvy

12.2.5 Rozběh motoru s kroužkovou kotvou (rotorové spouštění)

Zařazením spouštěcích odporů do obvodu kotvy motoru s kroužkovou kotvou je možno výrazně omezit rozběhový proud. Kvůli velkému podílu činné složky proudu kotvy stoupá nejprve znatelně rozběhový moment. Momentová charakteristika je plošší, moment zvratu je posunut do oblasti rozběhu (obr. 1).

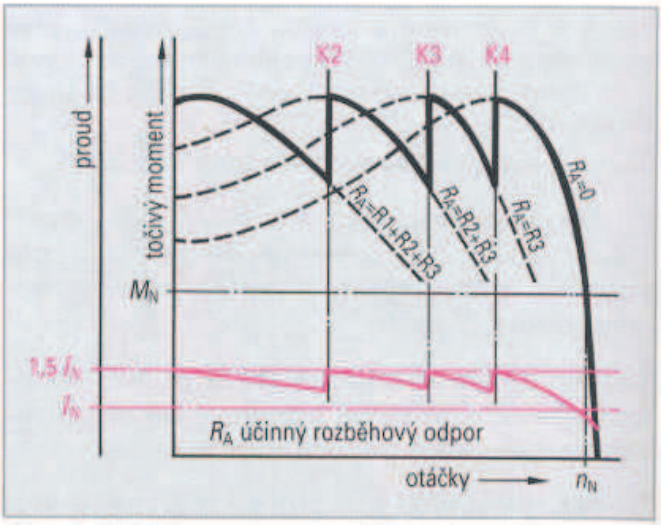
Motory s kroužkovou kotvou vyvíjejí velký rozběhový moment při malém rozběhovém proudu. Mohou být spouštěny zatížené.



Obr. 2 Motor s kroužkovou kotvou s třístupňovými rozběhovými odpory

Je-li během rozběhu stupňovitě zmenšován rozběhový odpor **(obr. 2)**, může se motor při správném nastavení spouštěče měkce rozbíhat i s velkým zatížením **(obr. 3)**. Jsou tak odstraněny špičky rozběhového proudu. Motory s výkony nad 20 kW mají většinou zařízení pro nadzvednutí kartáčů. Po rozběhu motoru jsou pomocí tyček kroužky zkratovány a současně jsou zvednuty kartáče.

Použití. Motory s kroužkovou kotvou jsou konstruovány od 5 kW do 500 kW. Používají se jako pohony přečerpávacích čerpadel, drtičů kamene a velkých obráběcích strojů a také jako pohony s velkými výkony a s těžkým rozběhem, např. pro zvedáky. Kvůli nebezpečí požáru (jiskření kartáčů) nesmějí být motory s kroužkovou kotvou používány v zemědělství.



Obr. 3 Točivý moment a rozběhový proud motoru s kroužkovou kotvou s třístupňovým rozběhovým odporem

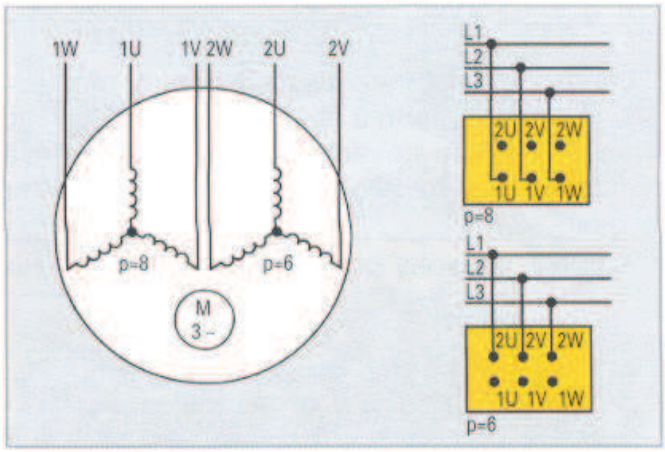
12.2.6 Motory s přepojovatelnými póly

Veřejná napájecí síť má pevný kmitočet a změna otáček je u motorů s kotvou nakrátko prováděna přepínáním pólů. Mění-li se počet pólů statoru, mění se otáčky točivého pole a tím i otáčky rotoru.

Motor s oddělenými statorovými vinutími

Dvě oddělená statorová vinutí s rozdílnými počty pólů **(obr. 1)** umožňují dvoje otáčky, které mohou být v libovolném celočíselném poměru, např. 3 : 4. Točivý moment je při obojích otáčkách téměř stejný, výkony motoru jsou přibližně v poměru otáček.

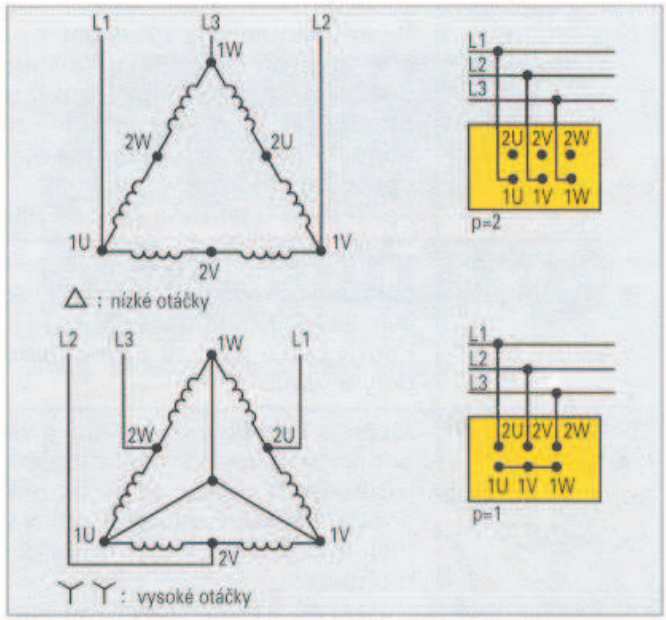
Motory s oddělenými vinutími mají zvýšené náklady na vinutí i elektroplechy. Jsou proto používány jen tam, kde není použitelný poměr otáček 1 : 2. Na svorkovnici jsou zpravidla vyvedeny jen začátky vinutí (obr. 1).



Obr. 1 Motor s přepojovatelnými póly se dvěma oddělenými statorovými vinutími

Motor s dělenými vinutími statoru

Při děleném vinutí (Dahlanderovo zapojení) je každé vinutí statoru rozděleno odbočkou na dvě části. Přepínáním skupin (cívek) ze sériového zapojení na paralelní zapojení je totiž původní počet pólů zmenšen na polovinu a tím se zdvojnásobí otáčky točivého pole statoru (vinutí na str. 334).



Obr. 2 Motor s přepojovatelnými póly s Dahlanderovým vinutím (trojúhelník – dvojitá hvězda)

Nejpoužívanější Dahlanderovo zapojení je zapojení **trojúhelník – dvojitá hvězda (obr. 2).** Sériové spojení částí vinutí znamená sdružení vinutí do trojúhelníka, při paralelním zapojení umožní sdružení do hvězdy snížením napětí zabránit vysoké indukci v oblasti drážek statoru. Tím je dosaženo pomocí zdvojnásobení otáček přibližně 1,5-té zvýšení výkonu. Točivý moment zůstává v obou oblastech stejný. Proto se motory s Dahlanderovým zapojením hodí zvláště dobře pro pohony s konstantním točivým momentem, např. pro obráběcí stroje.

Motory s Dahlanderovým zapojením umožňují zdvojnásobení otáček zmenšením počtu pólů na polovinu.

Svorkovnice motoru s Dahlanderovým zapojením má pro každý počet pólů 3 svorky, neboť části vinutí bývají nejčastěji spojeny na statoru (obr. 2). Motor proto může být používán jen na jediné síťové napětí.

Svorky pro nízké otáčky jsou označeny 1U, 1V, 1W a pro vysoké otáčky 2U, 2V, 2W. Zde často bývají od výrobce přehozeny svorky 1U a 1W. Výměna je vyžadována, aby při připojení stejného typu zůstal zachován směr otáčení motoru při obou hodnotách otáček.

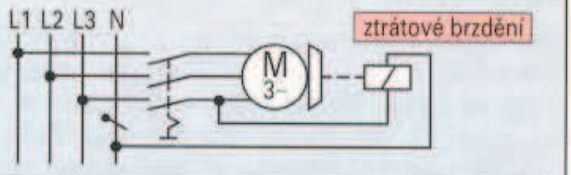
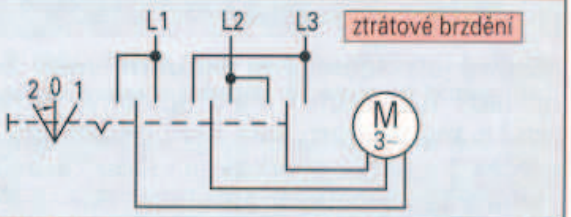
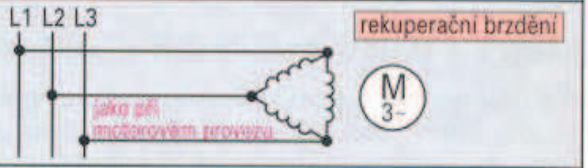
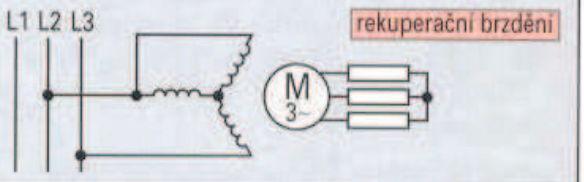
Má-li motor dvě oddělená a zároveň dělená vinutí, je možno přepojováním získat až 4 různé otáčky.

Motory s přepojovatelnými póly jsou ve zvláštních případech provedeny jako přepojovatelné dvojitá hvězda – trojúhelník (YY/Δ) nebo hvězda – dvojitá hvězda (Y/YY). Motory s přepínáním YY/Δ mají při obou stupních otáček stejné výkony. Motory s přepínáním Y/YY mají při dvojnásobných otáčkách čtyřnásobný točivý moment (použití např. pro motory ventilátorů).

12.2.7 Brzdění trojfázových asynchronních motorů

Pohony s trojfázovými asynchronními motory musí být často zabrzděny, např. u jeřábů při spouštění břemene nebo u obráběcích strojů při rychlém zastavení. K brzdění se nabízí řada možností **(tabulka)**. Při ztrátovém brzdění je přeměňována kinetická energie v energii tepelnou, při rekuperačním brzdění je přeměňována kinetická energie v elektrickou energii.

Tabulka: způsoby brzdění pohonů s trojfázovými asynchronními motory

označení	popis činnosti	zapojení (funkční)
elektromagnetický odbrzďovač (přítlaková pérová brzda)	Třecí přítlaková brzda je přitlačovaná pérem při vypnutém motoru. Při zapnutí motoru je brzda elektromagnetem odtažena od brzdného kotouče. Používá se u obráběcích strojů a u zdvihacích mechanismů.	
brzdění protiproudem	Brzdný moment je způsoben opačným směrem točivého pole statoru, docíleným přehozením dvou fázových přívodů. Po zastavení je nutno motor odpojit, aby se nezačal rotor otáčet opačným směrem. Používá se u pohonu pásové pily.	
nadsynchronní brzdění	Motor je poháněn mechanicky spřaženým mechanismem a pracuje jako asynchronní generátor. Používá se u motorů s přepínatelnými póly u jeřábů.	
podsynchronní brzdění	Motor s kroužkovou kotvou, s velkými odpory v obvodu kotvy, zapojený jako jednofázový motor, vyvíjí při otáčení doprava otáčivý moment doleva. V klidovém stavu nevzniká brzdný moment.	
brzdění stejnosměrným proudem	Statorové vinutí je připojeno na nízké stejnosměrné napětí. Proud indukovaný v otáčejícím se rotoru brzdí. Používá se u obráběcích strojů a pohonu navijáků.	

Energie odebraná asynchronním motorem během (nezatíženého) rozběhu je vzhledem ke klesajícímu skluzu přeměněna přibližně z jedné poloviny na teplo a z druhé poloviny na kinetickou energii rotoru. Při brzdění je třeba odebrat a přeměnit energii rotoru (případně soustavy spojené s rotorem přes hřídel motoru). Při brzdění třecí brzdou, podasynchronním brzděním a při brzdění stejnosměrným proudem tekoucím statorem je energie rotoru přeměňována v teplo. Při nadsynchronním brzdění pracuje motor jako generátor, takže dochází jen k malým ztrátám. Nadsynchronní brzdění lze dobře využít u motorů s přepojitelnými póly, když přepólujeme z vysokých otáček na nízké a kotva pak předbíhá točivé (pomalootáčkové) pole statoru. Pokud se u motoru s přepojitelnými póly s poměrem počtů pólů 2 : 1 použije třecí brzda jen k dobrzdění z poloviční otáček, budou tepelné ztráty při brzdění činit jen 25% ztrát podobného motoru bez přepojitelných pólů. Při brzdění opačným proudem (statoru) jsou ztráty zvláště veliké, neboť skluz klesá během brzdění z 200% na 100%.

Je-li motor během brzdění zatížen, musí být při brzdění přeměněna navíc energie soustavy spojená s hřídelí motoru. I zde je možno použít ztrátové nebo rekuperační brzdění.

Nadsynchronní brzdění je výhodné, brzdění opačným proudem je nevýhodné.

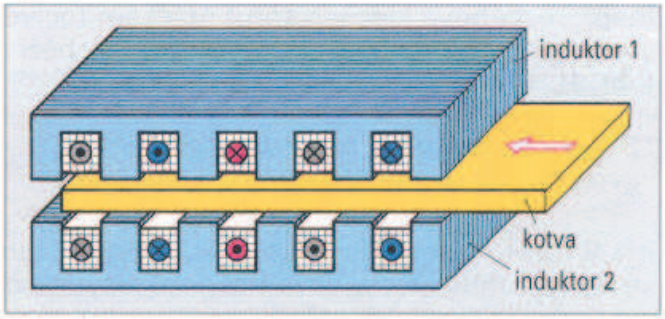
12.2.8 Trojfázové lineární motory

Lineární motory jsou pohony, které vyvolávají lineární pohyb **(obr. 1)**.

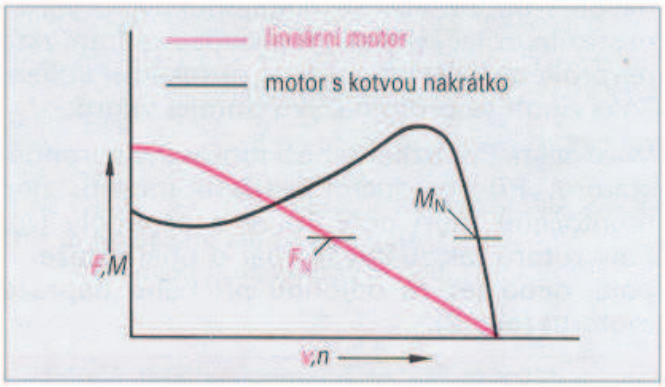
K pochopení činnosti lineárního motoru je možno si představit statorové vinutí rotačního motoru na obvodu přeříznuté a rozvinuté do roviny. Je-li toto rozvinuté vinutí opět napájeno trojfázovým proudem, pohybují se magnetické póly v rovině jedním směrem, např. zleva doprava. Namísto točivého pole tak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

V lineárním motoru působí magnetické postupné pole.

Obr. 1 Magnetická dráha poháněná lineárním motorem



Obr. 2 Lineární motor se dvěma induktory



Obr. 3 Charakteristiky lineárního motoru a motoru s kotvou nakrátko

Konstrukce. Budicí část vytvářející postupné magnetické pole, odpovídající statoru trojfázového motoru, se nazývá **induktor (obr. 2)**. Skládá se ze svazku induktorových plechů hřebenového tvaru a trojfázového vinutí uloženého v drážkách induktoru. Používají se dva induktory umístěné proti sobě (obr. 2), nebo jeden induktor. Pohyblivá část lineárního motoru odpovídající rotoru zapojenému nakrátko se nazývá **kotva**. Kotva je uložena mezi oběma induktory a je tvořena masivním vodivým tělesem, například hliníkovou deskou. Kotva z feromagnetického materiálu, např. z oceli, umožňuje postrádat jeden z induktorů, protože magnetický tok mezi póly se uzavírá přes kotvu mezi póly jednoho induktoru (a nemusí se uzavírat mezi protějšími póly dvou induktorů). Ocelová kotva může být potažena dobrým vodičem, např. hliníkem.

Princip činnosti. Postupné pole induktoru indukuje v kotvě silné vířivé proudy. Podle Lenzova pravidla jsou tyto proudy takového směru, že jejich indukované pole oslabuje postupné pole induktoru. Vířivé proudy vyvolají v prostředí postupného pole induktoru sílu ve směru pohybu postupného pole. Je-li induktor upevněn a kotva pohyblivě uložena, pohybuje se kotva s postupným polem. Je-li naopak pohyblivý induktor a kotva upevněná, pohybuje se induktor v opačném směru než postupné pole.

U lineárního motoru může být pohyblivý induktor nebo pohyblivá kotva.

Vlastnosti. Lineární motory se chovají podobně jako asynchronní motory. Rychlost postupného pole závisí na kmitočtu budicího proudu, uspořádání a vzájemné vzdálenosti pólů induktoru. K indukčnímu působení postupného pole na kotvu je nutný skluz při pohybu. Při zatížení může skluz přesáhnout 50%, neboť lineární motory mají velkou vzduchovou mezeru a velký odpor kotvy (pro vířivé proudy). Proto bývá rychlost pohybu mnohem menší než rychlost postupného pole.

Lineární motory pracují s velkým skluzem a největší sílu mají při rozběhu **(obr. 3)**.

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

12.2.9 Synchronní motor

Konstrukce. Stator synchronního motoru má stejnou konstrukci jako stator asynchronního motoru. Na svazku statorových plechů je uloženo trojfázové vinutí, potřebné k vytváření točivého pole. Kotva se skládá z železného jádra, buď masivního nebo složeného ze svazku plechů a budicího vinutí, napájeného přes sběrné kroužky stejnosměrným proudem. Kotva působí jako elektromagnet, který má stejný počet pólů jako stator. U malých motorků bývají používány **kotvy z permanentních magnetů.**

Princip činnosti. Při zapnutí má točivé pole okamžitě otáčky odpovídající počtu pólů a kmitočtu napájecího napětí. Póly rotoru jsou přitahovány protipóly statoru a odpuzovány statorovými póly stejného druhu. Rotor se vzhledem ke své setrvačné hmotě neroztočí okamžitě synchronně s točivým polem statoru.

Jakmile se otáčky kotvy přiblíží díky rozběhovému systému (např. rozběhová klec v rotoru) otáčkám točivého pole, je kotva „vtažena" do synchronních otáček a běží dál synchronně **(obr. 1).**

Synchronní motory potřebují k rozběhu pomocný rozběhový systém.

Má-li rotor motoru **doplňkové vinutí nakrátko** (str. 289), může se synchronní motor rozbíhat jako asynchronní. Po rozběhu a zapnutí buzení kotvy pak běží motor synchronně. Během asynchronního rozběhu musí být budicí vinutí rotoru zkratováno přes odpor, aby se nenaindukovalo velké napětí, které by prorazilo izolaci vinutí. Při provozu zabrání zkratované vinutí při nárazovém kolísání zatížení prudkému kolísání otáček rotoru. Toto vinutí se proto nazývá **tlumicí vinutí.**

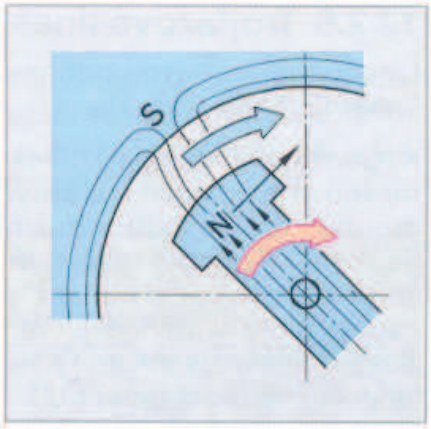
Vlastnosti. Po rozběhu běží motor synchronně s točivým polem statoru. Při rostoucím zatížení motoru narůstá vzdálenost (pootočení) mezi póly kotvy a protipóly (rotujícími) statoru. Póly rotoru tak zůstávají zpět o úhel zátěže za póly točivého pole, nebo též za polohou při běhu naprázdno (bez zatížení motoru) **(obr. 2).**

Synchronní motory mají i při zatížení stejné otáčky jako točivé pole statoru.

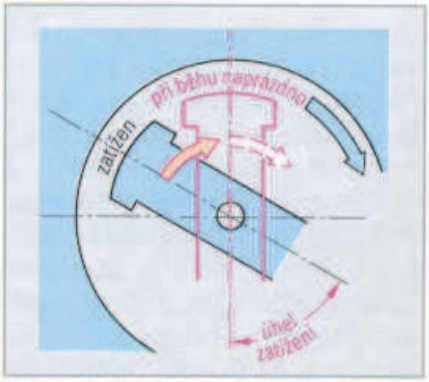
Točivý moment je tím větší, čím větší je úhel zátěže. Uprostřed mezi dvěma sousedními póly (kladným a záporným) statoru působí na póly rotoru největší síla, kdy předbíhající pól statoru táhne a následující tlačí. U dvoupólového motoru je tedy optimální úhel zátěže 90°. Při dalším nárůstu úhlu zátěže točivý moment opět klesá **(obr. 3).**

Moment zvratu nastane v polovině úhlu mezi sousedními póly, tj. při úhlu zátěže 90° u dvoupólového motoru.

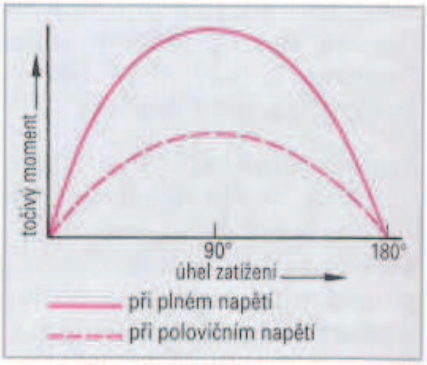
Synchronní motory většinou mají moment zvratu (maximální moment) dvojnásobný než jmenovitý moment. Při překročení momentu zvratu se přeruší spojení mezi točivým polem a kotvou. Kotva vypadne ze synchronizmu a zastaví se. Synchronní motory jsou však méně citlivé na pokles napětí než motory asynchronní. Magnetická indukce točivého pole a točivý moment se zmenšují proporcionálně s poklesem napětí (obr. 3).



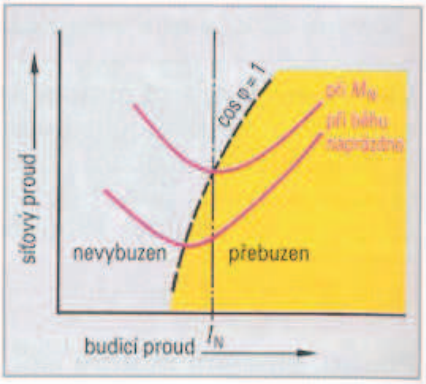
Obr. 1 Silové působení na otáčející se kotvu



Obr. 2 Úhel zatížení synchronního motoru



Obr. 3 Závislost točivého momentu na úhlu zatížení



Obr. 4 Synchronní motor jako fázový kompenzátor

Je-li synchronní motor provozován s větším než jmenovitým budicím proudem, mluvíme o přebuzeném provozu (synchronní generátor, str. 309). Motor působí současně jako generátor a dodává do sítě induktivní jalový výkon **(obr. 4, str. 300)**.

Synchronní motory mohou být tedy použity jako **kompenzátory fázového posunu**. V přebuzeném režimu mohou být použity ke kompenzaci jalového proudu jako kompenzační kondenzátory. V nevybuzeném (málo vybuzeném rotoru) režimu odebírají synchronní motory induktivní jalový výkon ze sítě.

Pro konstantní otáčky jsou synchronní motory používány také jako malé střídavé motory **(obr. 1)**. Tyto motory mají kotvu tvořenou permanentním magnetem, např. na principu stíněných pólů (str. 305). Jsou používány do elektrických hodin, programovaných časových spínačů, časových relé a jako pohon zapisovacích jednotek k měřicím přístrojům.

Obr. 1 Malé synchronní motorky s kotvou z permanentního magnetu (2 W až 5 W; 375,5 otáček/min)

12.3 Jiné motory s točivým magnetickým polem

Motory s točivým polem s kotvou nakrátko jsou robustní, levné a neruší rádio. Proto jsou konstruovány (kromě trojfázových) také na jednofázový střídavý proud i na stejnosměrný proud.

12.3.1 Roztáčecí motor (jednofázový motor bez pomocné fáze)

Pokus: Připojte na svorky U1 a V1 trojfázového motoru malého výkonu, např. 0,37 kW a 230 V (fázových napětí) na síťové napětí ~ 230 V.

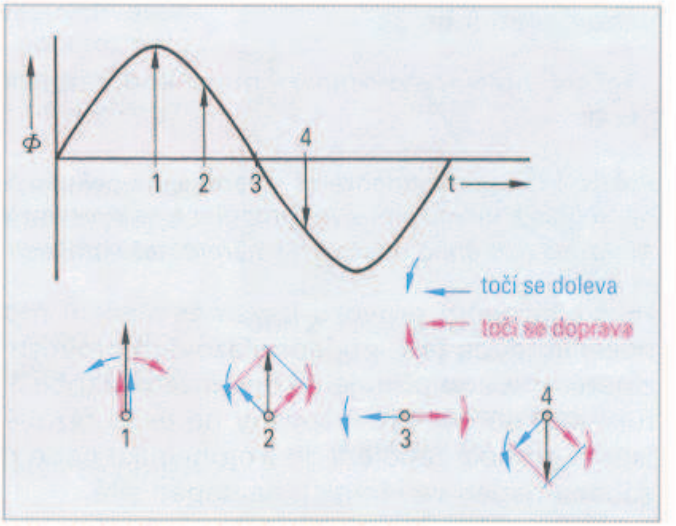
Motor bručí, ale netočí se.

Opatrně roztočte rotor rukou.

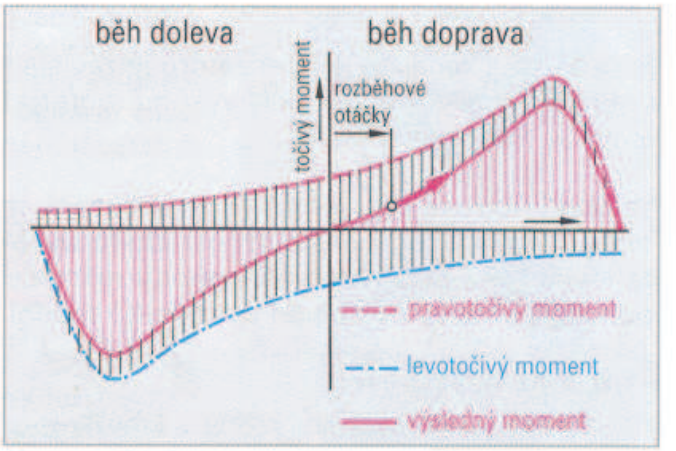
Motor se rozběhne ve směru roztočení.

Střídavé magnetické pole ve statoru je možno rozložit na dvě stejně silná točivá pole, která mají opačné směry otáčení **(obr. 2)**.

Je-li motor roztočen, např. pomocí řemenice, způsobí zesílení točivého pole působícího ve směru roztočení. Motor pak dále běží ve směru roztočení. Z charakteristiky točivého momentu je zřejmé **(obr. 3)**, že moment působící proti směru roztočení slábne s rostoucími otáčkami.



Obr. 2 Rozložení střídavého pole do dvou protisměrných polí



Obr. 3 Točivé momenty roztáčecího motoru

Magnetické střídavé pole působí na otáčející se klecový rotor točivým momentem.

Stator roztáčecího motoru obsahuje jen dvě vinutí U1, U2 (ze 3 možných) ve 2/3 drážek (Vinutí, str. 334).
Roztáčecí motory nacházejí uplatnění např. u malých míchaček betonu a u brusek.

12.3.2 Provoz trojfázového motoru na jednofázové střídavé napětí (Steinmetzovo zapojení)

Pokus 1: Připojte malý trojfázový motor Δ 230 V svorkou U1 na fázi L1 a svorkou V1 na neutrální vodič N střídavého napětí ~ 230 V a svorku W1 propojte přes kondenzátor 8 μF se svorkou U1 **(obr. 1)**.
Motor se sám rozběhne.

Trojfázové motory vytvářejí točivé pole při připojení na trojfázovou síť pomocí tří střídavých fázových napětí posunutých vzájemně o 120°. Ve vinutích statoru tak vznikají magnetické toky stejných indukcí, výsledné pole je tedy kruhové **(obr. 2)**.

Při provozu na jednofázové střídavé napětí je proud přivedený přes kondenzátor oproti síťovému proudu fázově posunut. Při tomto posunutí opět vznikne točivé magnetické pole. Vlivem kondenzátoru jsou proudy v jednotlivých vinutích různě velké. Tím se mění indukční tok periodicky s každou periodou střídavého napětí **(obr. 3)**.

Točivé pole vytvořené pomocí kondenzátoru má eliptický tvar.

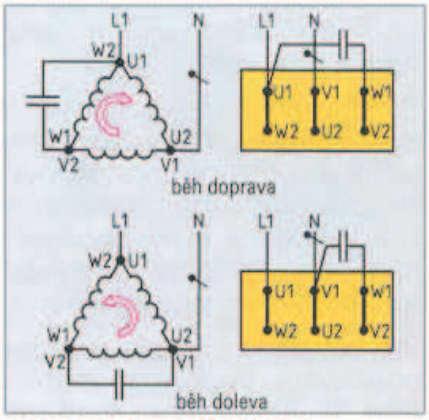
Pokus: Přepojte kondenzátor v zapojení z pokusu 1 tak, že svorka W1 bude přes kondenzátor nyní propojena se svorkou V1 (obr. 1).
Motor se rozběhne opačným směrem než v pokusu 1.

Při trojfázovém provozu lze směr otáčení motoru změnit přehozením dvou fází, při jednofázovém provozu lze směr otáčení změnit změnou připojení kondenzátoru (obr. 1). Trojfázové motory mohou být provozovány na jednofázové střídavé napětí, jsou-li pomocí zapojení do trojúhelníku nebo do hvězdy přizpůsobena napětí ve vinutích na napětí sítě.

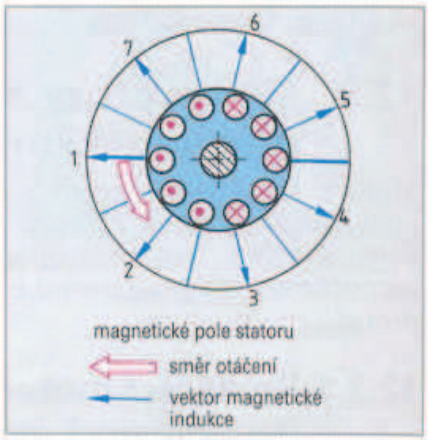
Při eliptickém točivém poli je oproti kruhovému poli při trojfázovém provozu menší výkon motoru, a to maximálně 70% jmenovitého výkonu. Rozběhový moment se zmenší při tomto jednofázovém provozu většinou na polovinu.

Požadovaná kapacita kondenzátoru je závislá na síťovém napětí. Při 230 V je 70 μF na 1 kW výkonu motoru (při síťovém kmitočtu 50 Hz).

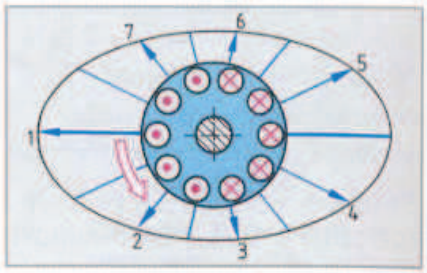
Ve Steinmetzově zapojení jsou provozovány motory do výkonu max. 2 kW, pokud není možnost trojfázového připojení. Toto zapojení bývá používáno při pohonu míchaček na beton a pro pohon oběhových čerpadel ústředního topení.



Obr. 1 Trojfázový motor připojený na jednofázové střídavé napětí (Steinmetzovo zapojení)



Obr. 2 Kruhové točivé magnetické pole (trojfázový provoz)



Obr. 3 Eliptické točivé magnetické pole (pro Steinmetzovo zapojení nebo kondenzátorový motor)

Otázky k opakování

1. **Čím se liší konstrukčně motor s kroužkovou kotvou od motoru s kotvou nakrátko?**
2. **Jaké přednosti má rotorové spouštění motorů s kroužkovou kotvou oproti statorovému spouštění motorů s kotvou nakrátko?**
3. **Jak se mění v Dahlanderově zapojení otáčky a výkon při přepínání z trojúhelníka na dvojitou hvězdu?**
4. **Jakými způsoby se brzdí trojfázové asynchronní motory?**
5. **Jak jsou moderní synchronní motory vybaveny pro rozběh?**
6. **Co se stane, je-li při zatěžování synchronního motoru překročen moment zvratu?**
7. **Proč se mohou trojfázové motory ve Steinmetzově zapojení samy rozběhnout?**

12.3.3 Jednofázový indukční motor

Jednofázový indukční (asynchronní) motor má ve statoru, složeném ze statorových plechů, dvojí vinutí. Rotor je v klecovém provedení.

Hlavní vinutí vyplňuje 2/3 drážek ve statoru a je připojeno na svorky označené U1, U2. Pomocné vinutí (pomocná fáze) je ve zbývající třetině drážek a je o 90° pootočeno oproti vinutí hlavnímu **(obr. 1)**.

Předpokladem pro vznik točivého magnetického pole statoru je časové posunutí průběhu střídavého proudu v pomocném vinutí oproti průběhu proudu v hlavním vinutí **(obr. 2)**.

Střídavá magnetická pole hlavního a pomocného vinutí jsou pak vzájemně časově a tedy i prostorově posunuta (pootočena) a společně vytvářejí točivé magnetické pole **(obr. 3)**. Točivé pole jednofázového asynchronního motoru uskuteční i rozběh motoru.

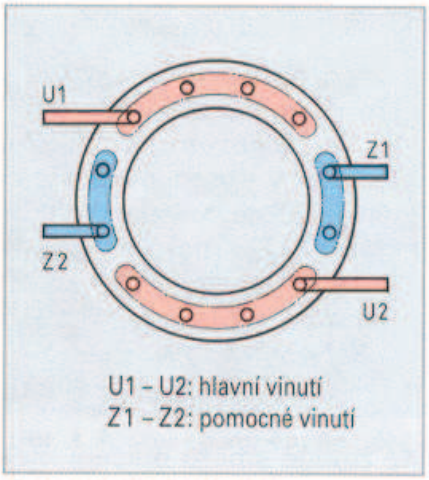
Jednofázové indukční motory se rozbíhají samy.

Otáčky motoru jsou určeny stejně jako u trojfázových asynchronních motorů kmitočtem napájecího napětí a počtem pólových párů hlavního vinutí. Na obrázku 3 je znázorněn vznik točivého pole situacemi odpovídajícími okamžikům 1 a 2 označeným v grafu na obrázku 2.

Fázového posunutí mezi proudy v hlavním a pomocném vinutí je dosaženo kondenzátorem, činným odporem nebo zvýšenou indukčností pomocného vinutí. Diagram průběhu indukčnosti točivého pole má eliptický tvar **(obr. 3 na str. 302)**.

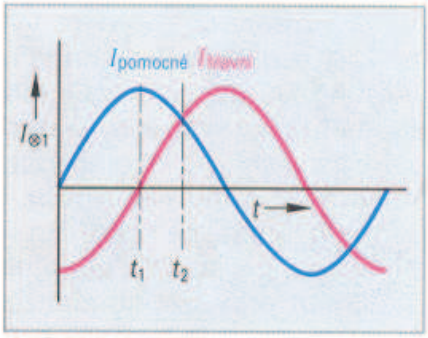
Je-li do pomocného vinutí jednofázového indukčního motoru zapojena kapacita, indukčnost nebo činný odpor, vznikne v motoru točivé magnetické pole.

Jednofázové indukční motory s pomocnou indukčností se používají jen zřídka pro malý rozběhový moment.



U1 – U2: hlavní vinutí
Z1 – Z2: pomocné vinutí

Obr. 1 Vinutí statoru jednofázového indukčního motoru



Obr. 2 Fázový posun mezi proudy v hlavním a v pomocném vinutí jednofázového motoru s pomocnou fází

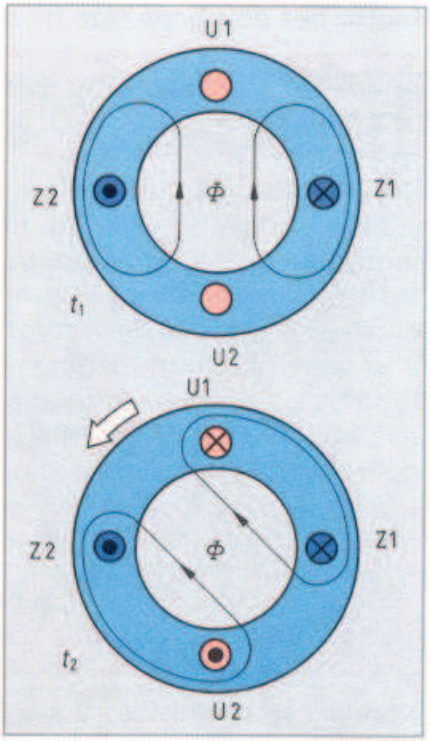
12.3.4 Jednofázový motor s pomocnou odporovou fází

Je-li pomocné fázi (pomocnému vinutí) jednofázového motoru předřazen odpor, vznikne v motoru točivé magnetické pole. Potřebný činný odpor lze vytvořit pomocným vinutím z odporového drátu. Většinou je toto vinutí provedeno jako **bifilární vinutí** (str. 334). Třetina závitů je zde navinuta v protisměru k ostatnímu vinutí.

V bifilárním vinutí je částečně snížena indukčnost vinutí při nezměněném činném odporu odporového drátu.

Pomocná odporová fáze (pomocné vinutí) musí být po rozběhu odpojena, aby nedocházelo k přehřívání motoru. K odpojení lze použít např. odstředivého vypínače. Po rozběhu motor pracuje jako roztáčecí motor (jednofázový motor bez pomocné fáze).

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



Obr. 3 Magnetické pole statoru v okamžicích t_1, t_2 odpovídajících obrázku 2

12.3.5 Kondenzátorový motor

Kondenzátorový motor je jednofázový asynchronní motor s kondenzátorem v pomocné fázi. Kondenzátor vytváří potřebné fázové posunutí v pomocné fázi, potřebné pro vznik točivého pole. Kondenzátor je většinou připevněn na krytu motoru **(obr. 1)**. Při neděleném pomocném vinutí je kondenzátor sériově předřazen **(obr. 2)** a při děleném pomocném vinutí je kondenzátor sériově zapojen mezi jeho dílčí části.

Ke změně směru otáčení motoru je třeba přepólovat směr proudu v pomocném vinutí. Toho lze dosáhnout změnou připojení kondenzátoru na svorkovnici (obr. 2).

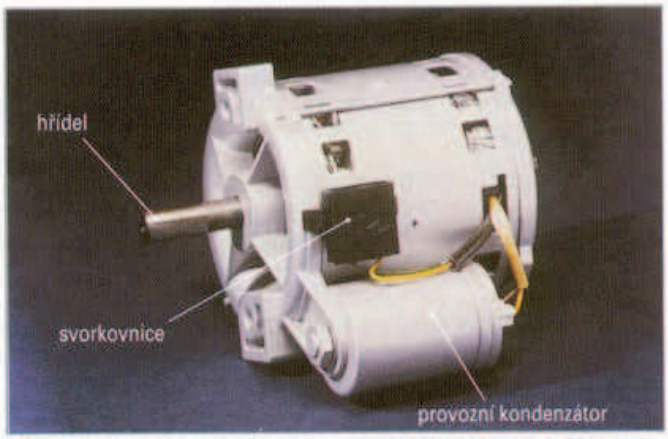
Velký rozběhový moment vykazuje motor při použití rozběhového kondenzátoru C_A a provozního kondenzátoru C_B **(obr. 3)**. Rozběhový moment může být díky kapacitě obou kondenzátorů zvýšen na dvojnásobek až trojnásobek jmenovitého momentu **(obr. 4)**. Motor se pak může rozbíhat i se zátěží. Po rozběhu se rozběhový kondenzátor C_A odpojuje a v činnosti zůstává jen provozní kondenzátor C_B. Odpojení je nutné, protože by jinak protékal pomocným vinutím příliš velký proud, který by vinutí přehřál. Odpojení se uskutečňuje tepelným nebo nadproudovým relé, nebo odstředivým vypínačem. Při odpojení obou kondenzátorů by motor pracoval jako jednofázový asynchronní motor bez pomocné fáze (roztáčecí motor).

Rozběhový kondenzátor se po rozběhu motoru odpojuje.

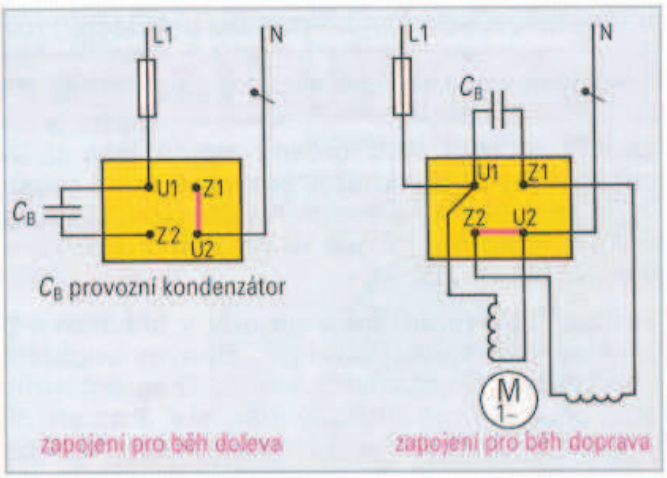
Provozní kondenzátor by měl mít přibližně 1,3 kvar jalového výkonu na 1 kW výkonu motoru. Rozběhový kondenzátor by měl mít asi trojnásobnou kapacitu než provozní kondenzátor. Kondenzátor tvoří s indukčností pomocného vinutí sériový kmitavý obvod. Proto je na kondenzátoru napětí, které je vyšší než napětí síťové. Největší napětí je na kondenzátoru při běhu motoru naprázdno.

Kondenzátory kondenzátorového motoru musí být dimenzovány na největší napětí, které se na nich vytvoří při běhu nezatíženého motoru (naprázdno).

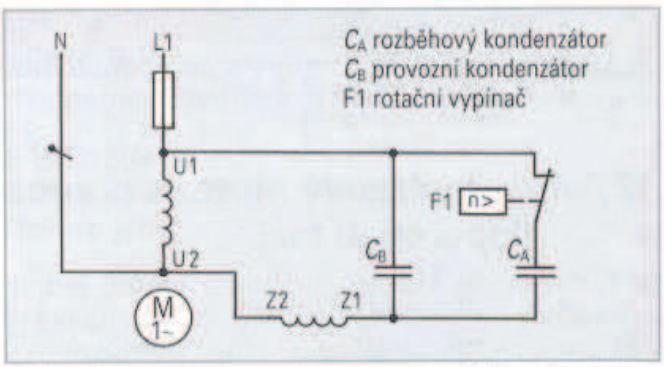
Kondenzátorové motory s výkonem do 2 kW se používají v domácích spotřebičích, v elektrickém nářadí a stavebních strojích, např. v ledničkách a pračkách.



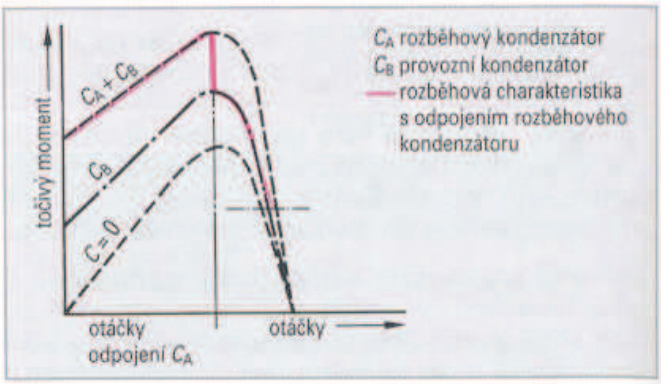
Obr. 1 Kondenzátorový motor s kondenzátorem



Obr. 2 Zapojení při neděleném pomocném vinutí



Obr. 3 Kondenzátorový motor s rozběhovým a provozním kondenzátorem

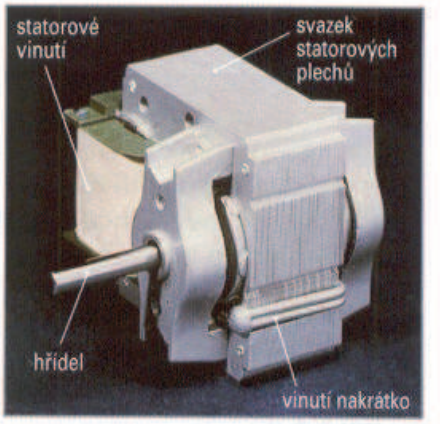


Obr. 4 Momentové charakteristiky kondenzátorového motoru

12.3.6 Motor se stíněnými póly

Rychloběžný motor se stíněnými póly

Stator motoru se stíněnými póly **(obr. 1)** má oddělené póly. Od nich je oddělena drážkou menší část. Kolem tohoto odděleného (odstíněného) pólu je uloženo vinutí nakrátko **(obr. 2)**. Tímto vinutím nakrátko prochází jen část magnetického toku statorového vinutí. Dochází tak k velkému rozptylu. Mezi proudem ve statorovém vinutí a proudem tekoucím vinutím nakrátko je fázový posun. Tyto fázově posunuté proudy vytvářejí magnetické pole, jehož magnetické póly se postupně posunují od jednoho statorového pólu k dalšímu v pořadí: hlavní pól 1, odstíněný (oddělený) pól 1, hlavní pól 2, odstíněný pól 2. Toto nerovnoměrné točivé pole otáčí kotvou nakrátko.



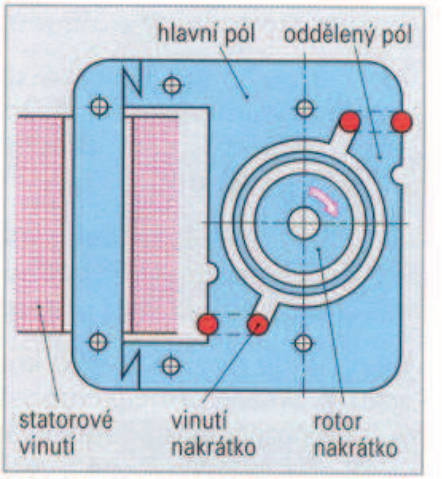
Obr. 1 Motor se stíněnými póly

Směr otáčení motoru se stíněnými póly směřuje vždy od hlavního pólu k oddělenému (odstíněnému) pólu.

Směr otáčení je podmíněn uspořádáním pólů a nemůže být elektricky změněn.

Je-li kotva vyrobena z magneticky tvrdého materiálu (hysterezní kotva), běží takový motor po rozběhu dále jako synchronní motor.

Motory se stíněnými póly jsou robustní a levné. Kvůli malé účinnosti kolem 30% se vyrábějí tyto motory jen asi do výkonů 300 W. Používají se do větráků topení, kalových čerpadel a odstředivek prádla. Jako synchronní pohon jsou používány např. pro programové spínače (např. mechanické programátory praček).



Obr. 2 Motor se stíněnými póly v asymetrickém provedení (2 pólovém)

Pomaloběžný motor se stíněnými póly

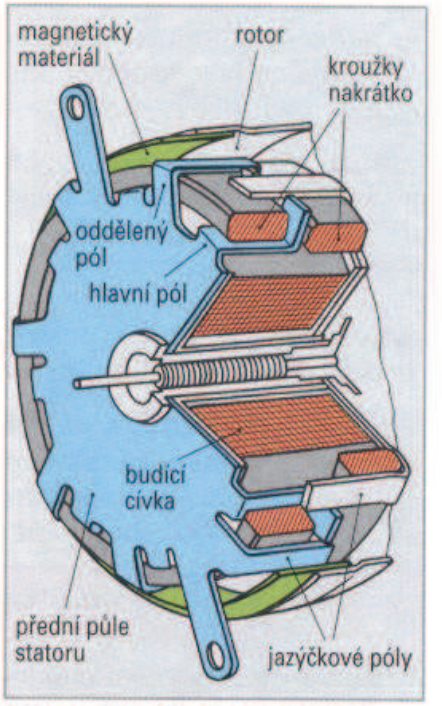
Pomaloběžné motory se stíněnými póly mívají 10 nebo 16 pólů a tomu odpovídající nízké otáčky. Jsou většinou provedeny s vnějším rotorem **(obr. 3)**. Stator se pak skládá z prstencové budicí cívky a dvou statorových polovin z ocelového plechu. Obě poloviny mají po obvodu plechové jazyky (zahnuté pásky), které působí jako jazýčkové póly. Pólování jazýčkových pólů obou statorových polovin je stejné, neboť je určováno magnetickým polem cívky.

Každý druhý pólový jazyk působí jako oddělený (odstíněný) pól. Kolem všech stíněných pólů jedné poloviny statoru leží společný prstenec nakrátko (obr. 3), který způsobuje fázové posunutí magnetických toků oddělených (odstíněných) pólů oproti magnetickým tokům hlavních pólů.

Rotor je přes jazýčkové póly nasazen jako hrnec. Na jeho vnitřní straně je kroužek z magneticky tvrdého materiálu. Magnetické pole statoru indukuje v rotoru vířivé proudy, které způsobují asynchronní běh rotoru. V magnetickém materiálu rotoru se vytvářejí točivým polem oddělené póly a rotor se pak otáčí otáčkami stejnými s otáčkami točivého pole.

Pomaloběžné motory se stíněnými póly jsou jednofázové synchronní motory.

Synchronní motory se stíněnými póly mívají výkony od 1 W do 3 W. Používají se např. v hodinách, v programovatelném řízení, časových relé, nebo v zapisovačích měřicích přístrojů.



Obr. 3 20-pólový synchronní motor se stíněnými póly

12.3.7 Krokový motor

Stejnosměrná vinutí statoru motoru mohou být pomocí stejnosměrných impulzů nastavována na proměnnou polaritu. Změnami směru proudu v jednotlivých vinutích dochází k přepólování jednotlivých pólových párů. Dochází-li k přepólování postupně v jednom směru, vznikne točivé pole, které se může měnit po krocích, nebo určitou rychlostí otáček.

Kotva z permanentního magnetu se vždy natočí podle polarity pole statoru.

Kotva krokového motoru může být řízena v krokovém nebo rovnoměrném otáčivém pohybu.

Krokové motory se vyrábějí jako jednofázové nebo vícefázové. Polarita statorových pólů může být měněna dvěma způsoby.

Je-li každé vinutí tvořeno dvěma cívkami **(obr. 1)**, mluvíme o **unipolárním provozu.** Každá cívka je zdrojem magnetického toku v jednom směru. Přepínáním cívek se mění polarity pólových párů statoru.

Je-li budicí vinutí každého magnetu tvořeno jen jednou cívkou a přepólování je realizováno změnou směru proudu v cívce, mluvíme o **bipolárním provozu (obr. 2).**

Na příkladu dvoufázového krokového motoru v bipolárním provozu je ukázán princip činnosti. Polohami přepínačů na obr. 2 je určeno natočení magnetické kotvy odpovídající společnému jižnímu a severnímu pólu obou statorových vinutí E1 a E2. Přepínačem S2 **(obr. 3)** je možno změnit polaritu vinutí E2. Poloha nových společných pólů se tak pootočí o 90° ve směru hodinových ručiček.

Přepnutím S1 je přepólováno vinutí E1 a kotva se pootočí o 90° do další nové polohy. Při dalším přepínání S2 a S1 se bude kotva pootáčet o odpovídající kroky (po 90°). Každé pootočení je označováno jako krokový úhel, který je tím menší, čím více fází a pólů má krokový motor.

Příklad: Vypočtěte krokový úhel krokového motoru zobrazeného na obr. 2. Počet pólových párů je $p = 1$, počet fází je $m = 2$.

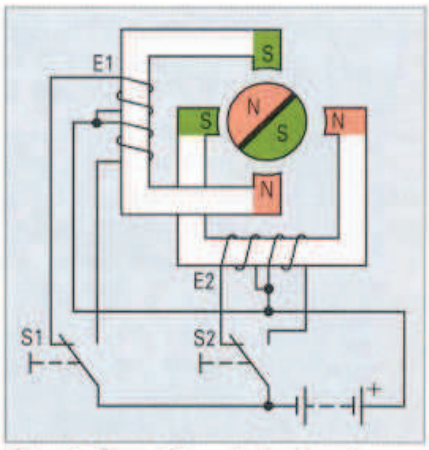
$$\alpha = \frac{360°}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{360°}{2 \cdot 1 \cdot 2} = 90°$$

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

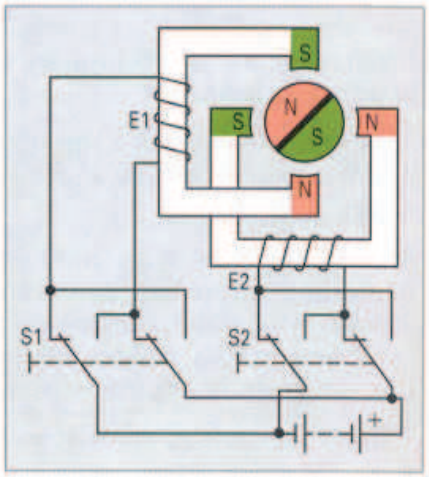
Protože k obsluze mechanických přepínačů je potřebná velká energie, přepínání je relativně pomalé a přepínače se opotřebovávají, je používáno elektronické přepínání, které elektronicky spíná potřebné stejnosměrné impulzy.

Krokové motory vyžadují speciální řídicí elektroniku.

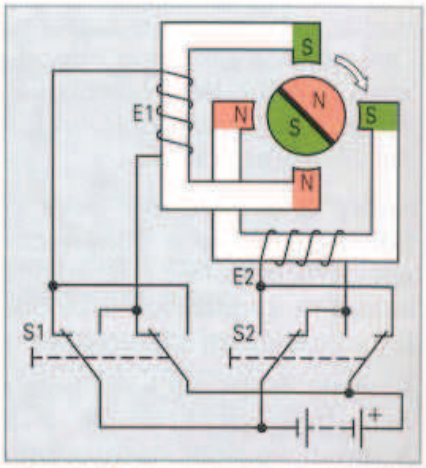
Krokové motory mění elektrické řídicí impulzy na odpovídající posloupnosti kroků bez přenosové chyby, takže zpětné kontrolní hlášení polohy není nutné.



Obr. 1 Dvoufázový krokový motor unipolární konstrukce



Obr. 2 Dvoufázový krokový motor bipolární konstrukce



Obr. 3 Krokový motor (obr. 2) po přepnutí S2

$$\alpha = \frac{360°}{2 \cdot p \cdot m}$$

α krokový úhel
m počet fází
p počet pólových párů

Krokový motor s malým krokovým úhlem

Požadovaný velký počet pólů krokového motoru vyžaduje speciální konstrukci. Pro velikost kroku 7,5° je motor konstruován na **jednopólovém principu (obr. 1)**. Na hřídeli motoru je permanentní magnet s axiálně uspořádanými póly, na jejichž čelních stranách jsou ozubená pólová kola. Zuby každého ozubeného pólového kola jsou téže polarity. Vzájemným mechanickým pootočením ozubených kol o půl zubové rozteče je dosaženo střídání polarity na obvodu rotoru **(obr. 2)**.

Stator složený z plechů má 2 vinutí (fáze). Každá fáze se skládá ze dvou sériově zapojených cívek, které vytvářejí protikladné statorové póly **(obr. 3)**. Ozubené vnitřní dělení statoru je shodné s ozubeným dělením rotoru. Ozubený rotor se vždy ustálí v poloze, ve které je magnetickému toku kladen co nejmenší odpor.

K vysvětlení principu je znázorněn motor s 9 zubovým rotorem a 2 zubovým statorem **(obr. 3a)**. Mezi severními póly předního pólového ozubeného kola jsou nastaveny jižní póly zadního pólového zubového kola. Rotor zaujme vždy polohu, ve které jeho zuby stojí oproti protikladným zubům statoru, a ve které je indukční odpor pro magnetický tok nejmenší.

Při přepólování směru proudu ve vinutí E1 se změní polarita statorových nástavců (zubů). Rotor na to reaguje pootočením o **krokový úhel,** např. o úhel 10° při uspořádání dle **obr. 3b**. Každé další přepólování v pořadí E2, E1, E2 atd. způsobí vždy pootočení o 10° ve směru hodinových ručiček.

Krokový motor na jednopólovém principu má mnohapólový rotor a umožňuje pootáčení s malým úhlem otočení.

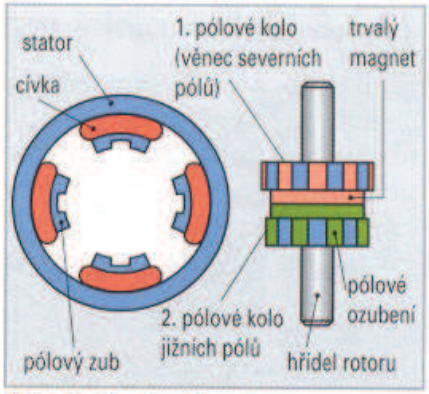
Je-li krokový motor napájen konstantním napětím, narůstá se zvětšujícím se kmitočtem jalový indukční odpor statoru. Tím klesá odběr proudu (činného) a točivý moment motoru. Pokud by měl při nárůstu kmitočtu zůstat zachován proud a tím i točivý moment, musel by být motor napájen řízeným zdrojem konstantního proudu.

Při normálním zatěžovacím momentu se krokový motor vždy pootočí o krokový úhel, který odpovídá řídicímu impulzu. Může však dojít k tomu, že **zatěžovací úhel** (úhel skluzu rotoru) naroste do velikosti jednoho krokového úhlu. Protože se však tato chyba nepřipočítává znovu s každým krokem, nemůže být na konci série impulzů chyba větší, než je krokový úhel.

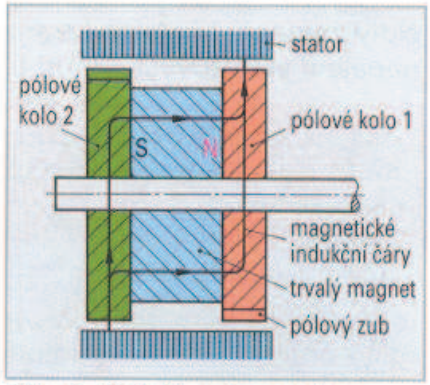
Krokový motor umožňuje velkou přesnost nastavení.

Při odpojení proudu statoru vznikne díky působení magnetů rotoru zároveň pevný zbytkový moment (pevné nastavení rotoru).

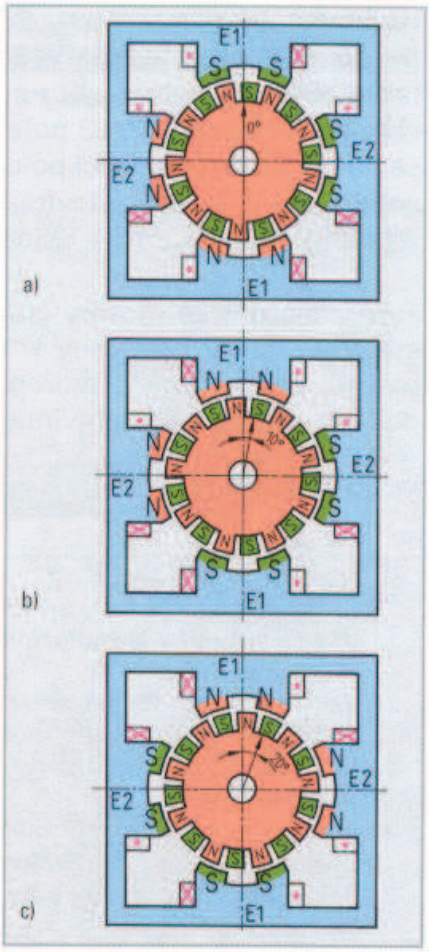
Motory s krokovým úhlem od 7,5° jsou konstruovány s jazýčkovými póly (str. 305). Pro jednoduchou konstrukci a velkou spolehlivost jsou krokové motory používány pro řízené pohony, dálkové řízení, dálnopisy, pohony tiskáren, počítadel a v jiných oblastech řídicí a regulační techniky.



Obr. 1 Krokový motor na principu stejných pólů



Obr. 2 Průběh pole v rotoru (princip jediného pólu)

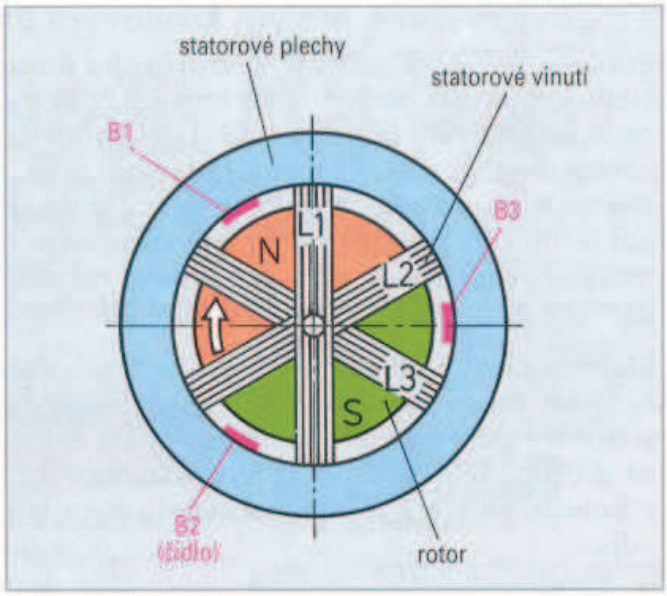


Obr. 3 Princip činnosti (princip stejných pólů)

12.3.8 Elektronický motor

Statorové vinutí elektronického motoru se skládá nejméně ze tří vinutí rovnoměrně rozmístěných po obvodu statoru, která jsou postupně buzena stejnosměrným proudem **(obr. 1)**. Postupným přepínáním se póly přemísťují po obvodu a vzniká tak točivé pole.

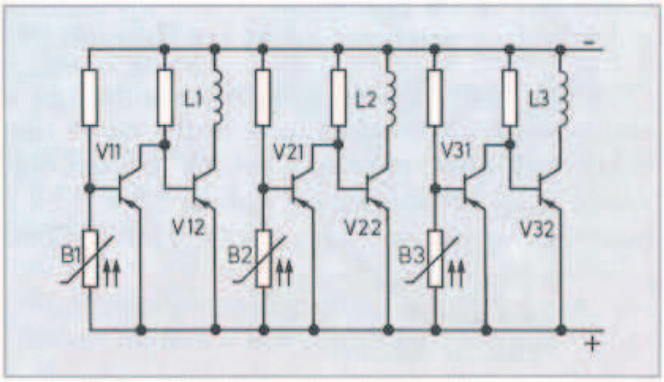
Kotva elektronického motoru je tvořena permanentním magnetem, který svým polem působí na magnetická čidla (magnetorezistory) umístěná na vnitřním obvodu statoru (obr. 1). V závislosti na poloze kotvy indikované těmito čidly zapínají a vypínají tranzistorové obvody napájení statorových vinutí L1, L2, L3.



Obr. 1 Konstrukce elektronického motoru

Buzení statorových vinutí elektronického motoru je řízeno magnetickým polem otáčející se kotvy.

Jako čidla polohy kotvy mohou být použity magnetorezistory **(obr. 2)**, jejichž odpor narůstá úměrně indukci okolního magnetického pole. Je-li kotva v poloze, při které je indukce velká u čidla B1, má tento magnetorezistor velký odpor. Potom je báze tranzistoru V11 záporná a V11 bude otevřený. Potom bude báze tranzistoru V12 kladná, V12 bude uzavřený, takže cívka L1 nebude buzena. Naproti tomu cívkami (vinutími) L2, L3 poteče proud a kotva se natočí do odpovídající polohy. Stejným způsobem se postupně otevírají tranzistory V21 a potom V31, přičemž V12 je opět otevřený.



Obr. 2 Řízení elektronického motoru pomocí magnetorezistorových snímačů

Také elektronické motory jsou konstruovány s vnějším rotorem. Při takovém uspořádání jsou statorové cívky rozloženy kolem vnitřního statorového jádra tvořeného svazkem statorových plechů. Vnější rotor je tvořen ocelovým prstencem opatřeným permanentními magnety, obklopujícím věnec budicích vinutí.

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

Otázky k opakování

1. **Jak se vytváří v jednofázovém asynchronním motoru točivé pole?**
2. **Jak je možno obrátit směr otáčení točivého pole kondenzátorového motoru?**
3. **K čemu jsou používány kondenzátorové motory?**
4. **Za jakých podmínek může být trojfázový motor provozován ve Steinmetzově zapojení?**
5. **Jak jsou konstruovány póly v motoru s odstíněnými póly?**
6. **Jak se určí směr otáčení točivého pole v motoru se stíněnými póly?**
7. **Jak je dosaženo otáčení rotoru krokového motoru?**
8. **Co je to kroková frekvence krokového motoru?**
9. **Proč existuje v krokovém motoru za klidového stavu moment přidržující rotor v klidové poloze?**
10. **Proč jsou otáčky krokového motoru stejné jako otáčky točivého pole?**
11. **Jaké elektronické prvky se používají k řízení elektronického motoru?**
12. **Jaké prvky slouží jako čidla polohy kotvy elektronického motoru?**

12.4 Synchronní generátor

Elektrická energie se většinou vyrábí pomocí synchronních generátorů **(obr. 1)**. V elektrárnách se většinou používají **stroje s vnitřními póly,** protože budicí proud přiváděný přes sběrné kroužky na rotor je podstatně menší, než vyráběné proudy odváděné ze statoru.

Konstrukce. Na rotoru je budicí vinutí napájené přes sběrací kroužky stejnosměrným proudem. Protože se magnetické pole rotoru nemění, není aktuální otázka ztrát v železe (hysterezí a vířivými proudy) a rotor tak může být vyroben z plného materiálu a je většinou ocelový. Rotory pro menší otáčky mají zvýrazněné póly **(obr. 2a)** a nazývají se rotory s vyniklými póly nebo magnetická kola. Rotory pro velké otáčky jsou většinou jen dvojpólové a jsou konstruovány jako **rotory s hladkým povrchem (obr. 2b).**

Budicí proud rotoru lze získat usměrněním síťového proudu. Napáječ pro buzení rotoru může být umístěn přímo na hřídeli rotoru **(obr. 3)**. Jako zdroj napájecí energie pro buzení rotoru se používá trojfázový budicí generátor, jehož proud je usměrňován a přiváděn k vinutím rotoru vedením v jeho hřídeli.

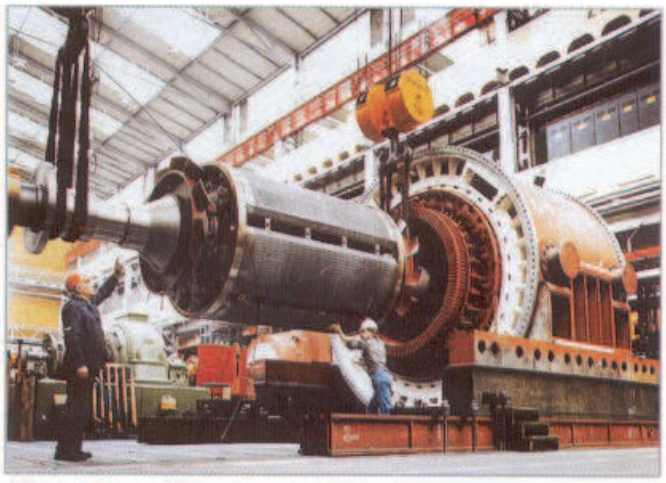
Stator generátoru je sestaven ze statorových plechů a v jeho drážkách je uloženo trojfázové statorové vinutí. Stator a rotor mají stejný počet pólů.

Princip činnosti a provozní vlastnosti

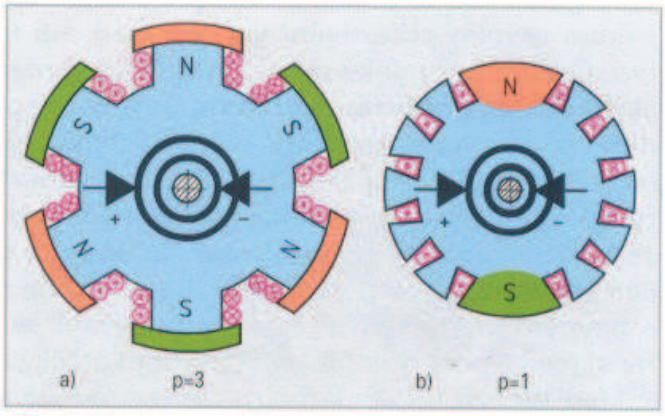
Rotor je poháněn nějakým hnacím strojem (v elektrárnách většinou parní turbínou). Budicí vinutí rotoru napájené stejnosměrným proudem indukuje magnetické pole nehybné vzhledem k rotoru a rotující vzhledem ke statoru. Toto rotující magnetické pole indukuje ve statorových vinutích pootočených vůči sobě o 120° tři střídavá napětí, která spolu vytvářejí trojfázové napětí. Ze statoru je odváděn trojfázový proud vyráběný generátorem.

Velikost napětí generátoru závisí na budicím proudu a na otáčkách rotoru. Protože kmitočet sítě je pevně dán, určuje tím i otáčky rotoru **(obr. 4a)**. Napětí se pak nastavuje velikostí budicího proudu **(obr. 4b)**. V oblasti nasycení jádra rotoru se charakteristika závislosti výstupního napětí na budicím proudu zplošťuje (obr. 4b). I bez budicího proudu produkuje generátor napětí díky zbytkovému (remanentnímu) magnetismu rotoru a toto napětí může být značné, i přes 100 V, a tedy životu nebezpečné.

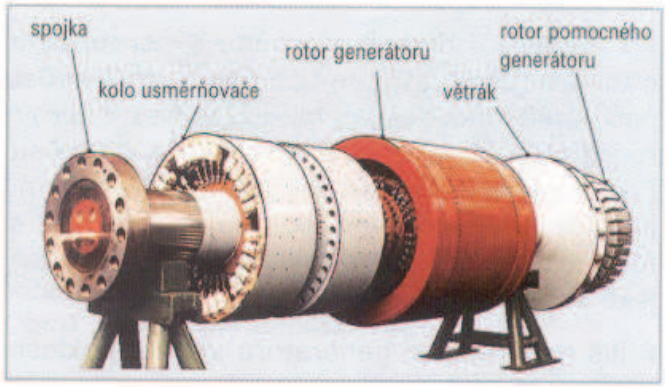
Napětí vyráběné synchronním generátorem stoupá s otáčkami a s budicím proudem. Kmitočet vyráběného napětí je dán otáčkami rotoru.



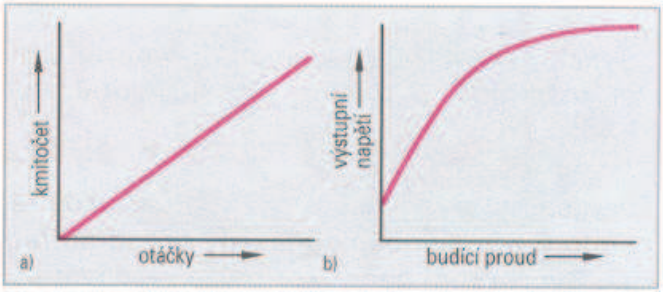
Obr. 1 Synchronní generátor (šestipólový)



Obr. 2 Druhy rotorů synchronních generátorů



Obr. 3 Sestava rotoru s vlastním buzením



Obr. 4 Charakteristiky synchronního generátoru