

## Automatizace a robotizace ve strojírenství

# *Elektrické pohony strojů a zařízení*

Vlastimil Hotař, ZS 2021



## *Elektrické pohony strojů a zařízení*

Elektrické pohony se staly výrazným **prostředkem k efektivní automatizaci** výroby a jejich význam v posledním období výrazně roste.

Speciální elektropohony v některých oblastech **nahrazují původně aplikované tekutinové motory** (pneumatické a hydraulické pohony).

Elektro pohony:

- stejnosměrné
- střídavé (1 fáze, více fází)
  
- synchronní
- asynchronní
  
- rotační
- lineární

## *Elektrické pohony strojů a zařízení*

Obecně lze používání elektropohonů v průmyslových aplikacích zjednodušeně vymezit takto:

- elektropohony s asynchronními motory,
- elektropohony se stejmoměrnými motory (DC pohony),
- elektropohony s bezkartáčovými motory (BLDC motory, EC motory, Brushless servopohony),
- elektropohony s krokovými motory,
- elektropohony s lineárními motory.

## Elektropohony s asynchronními motory

Elektropohony s asynchronními motory s kotvou nakrátko\* lze považovat za **nejjednodušší a nejrozšířenější** typ pohonů ve strojírenství.

Je přirozenou snahou využívat tyto **jednoduché, spolehlivé a cenově přístupné motory** v pohonech:

- výrobních strojů,
- dopravníků,
- zdvihacích zařízení,
- pomocných zařízení,
- periferií robotizovaných technologických pracovišť apod.

*\*Pozn.: U elektrických strojů rozumíme kotvou tu část stroje, do které je indukováno napětí.*

## *Elektropohony s asynchronními motory*

### Poznámky:

*Tok energie mezi hlavními částmi motoru (stator a rotor) je realizován výhradně pomocí **elektromagnetické indukce**, proto se často tento motor označuje jako motor indukční.*

<https://www.youtube.com/watch?v=LtJoJBUSE28>

[https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=60&v=a6xg4T8PKqs](https://www.youtube.com/watch?time_continue=60&v=a6xg4T8PKqs)

## *Elektropohony s asynchronními motory*

Pro menší výkony do 1 000 W se užívají často **jednofázové motory s pomocnou fází a kondenzátorem**.

Pro široký rozsah výkonů, už od 80 W se užívají **asynchronní motory trojfázové**, nejčastěji v provedení s **kotvou nakrátko**.

## *Elektropohony s asynchronními motory*



*Řez třífázovým asynchronním motorem s kotvou nakrátko*

## *Elektropohony s asynchronními motory*

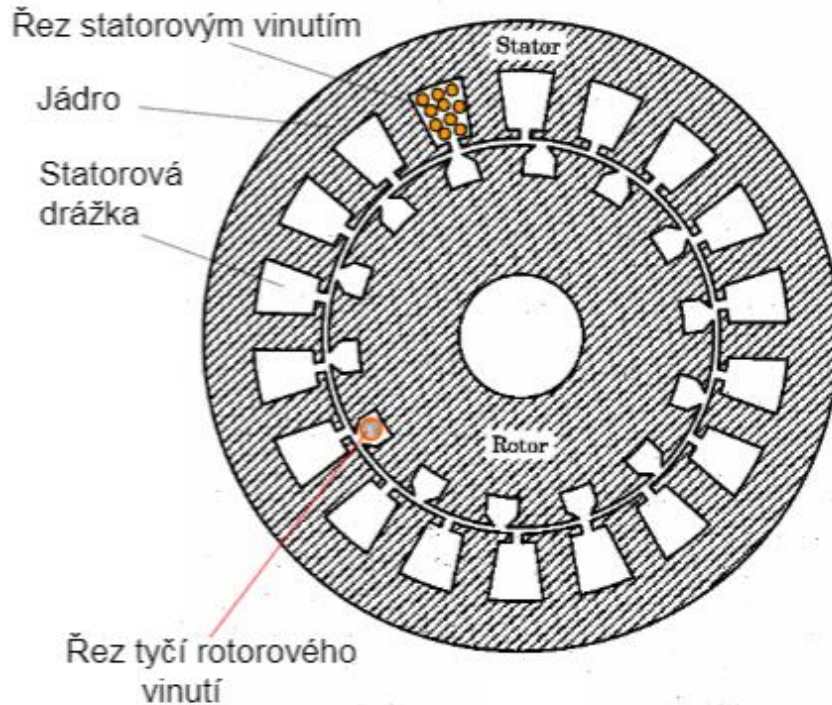
**Stator je vytvořen** z izolovaných plechů s drážkami, ve kterých prochází vinutí z izolovaných měděných vodičů.

**Kotva nakrátko** je tvořena klecí se **zešikmenými neizolovanými měděnými, mosaznými nebo hliníkovými tyčkami** a na obou koncích jsou tyče spojeny nakrátko prostřednictvím **zkracovacích kroužků**, které mohou mít širokou škálu provedení.

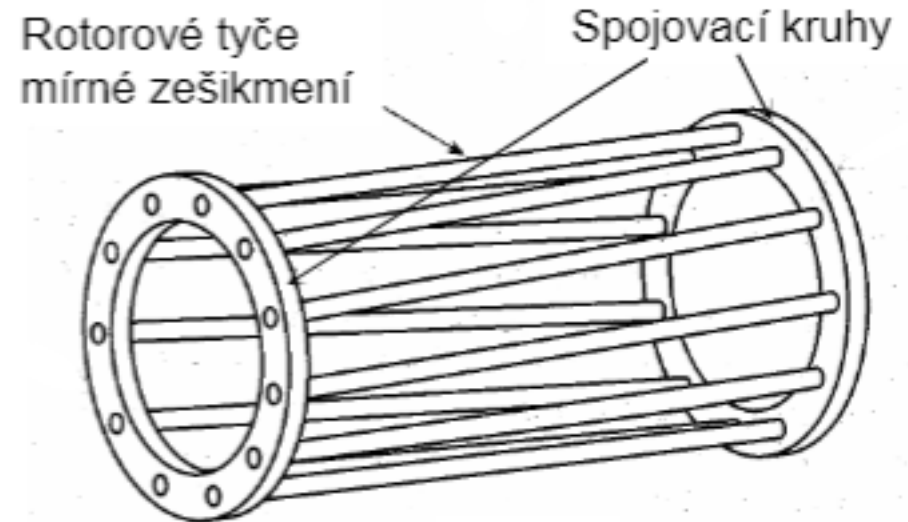
**Sešikmení tyček** přináší větší stabilitu chodu rotoru a odolnost proti vyšším harmonickým frekvencím a tím snížení hlučnosti chodu.



## Elektropohony s asynchronními motory



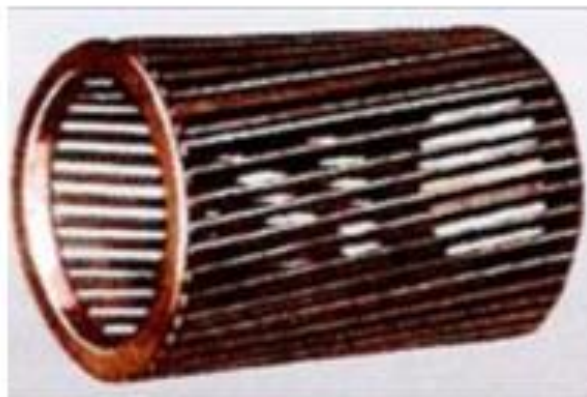
*Příčný řez motorem*



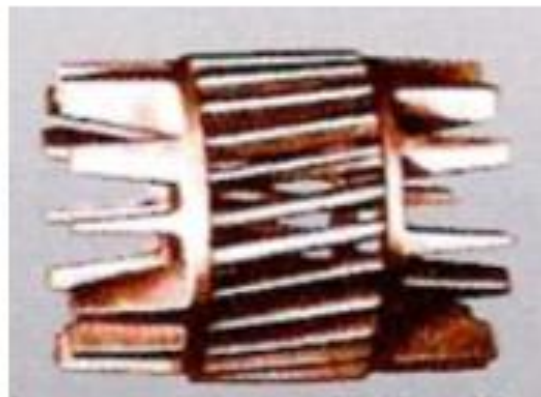
*Klec rotoru se zešikmenými tyčemi*

## Elektropohony s asynchronními motory

a)



b)



c)



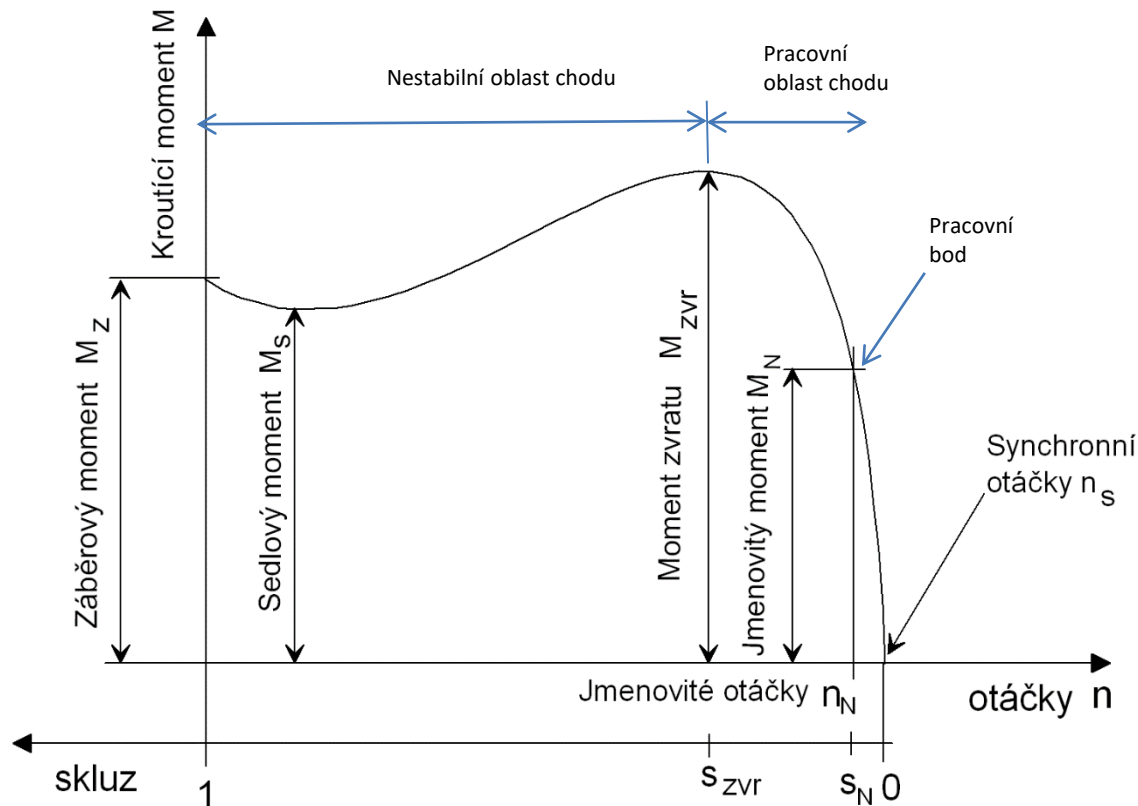
*Možná provedení klecí asynchronních motorů: a – klec se zešikmenými tyčkami; b – klec s omezenými tyčkami; c – stupňovitá klec*

## *Elektropohony s asynchronními motory*

Máme-li hodnotit možnosti aplikace asynchronních motorů, je nutné:

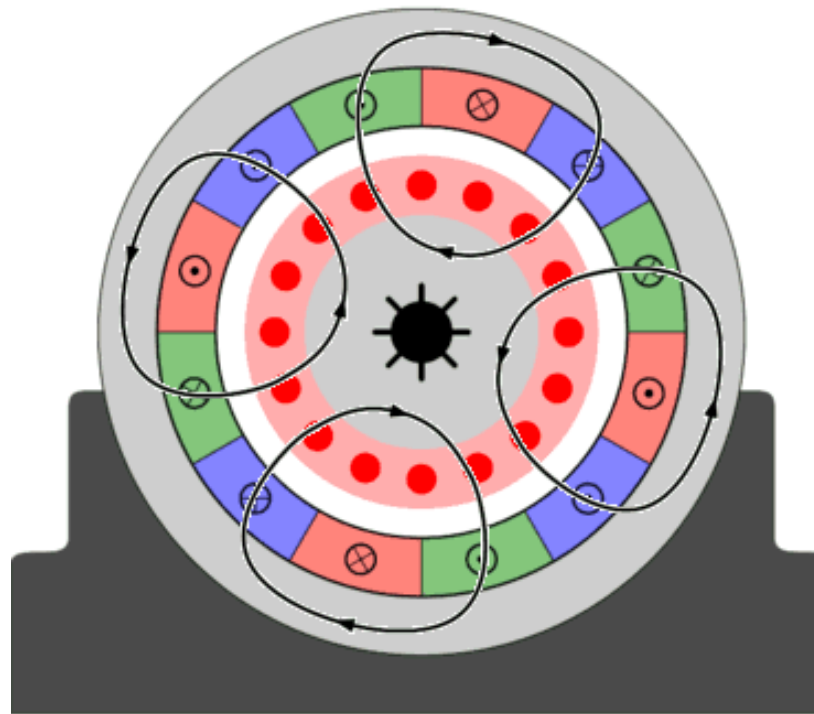
- sledovat charakteristiku asynchronního motoru a
- technické možnosti řízení rychlosti.

## Elektropohony s asynchronními motory



*Otáčko momentová charakteristika asynchronního motoru při konstantním napětí statoru a statorové frekvenci*

## Elektropohony s asynchronními motory



*Točivé pole tvořené statorem má větší rychlost než otáčky rotoru*

*Autor: BurnsBurnsBurns – Vlastní dílo, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4742871>*

## Elektropohony s asynchronními motory

Pro vytvoření točivého momentu je nezbytný určitý **rozdíl synchronních otáček**  $n_s$  rotoru odpovídajících napájecí frekvenci (točivého magnetického pole) a skutečných otáček  $n$  rotoru při daném zatížení, což lze popsat skluzem: 
$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

Pracovní oblast je uvažována pro hodnoty skluzu  $s \in (0; s_{ZVR})$ , tj. **ve stabilní oblasti charakteristiky** a pro rozběh motoru musí být záběrový moment  $M_Z < M_{ZVR}$

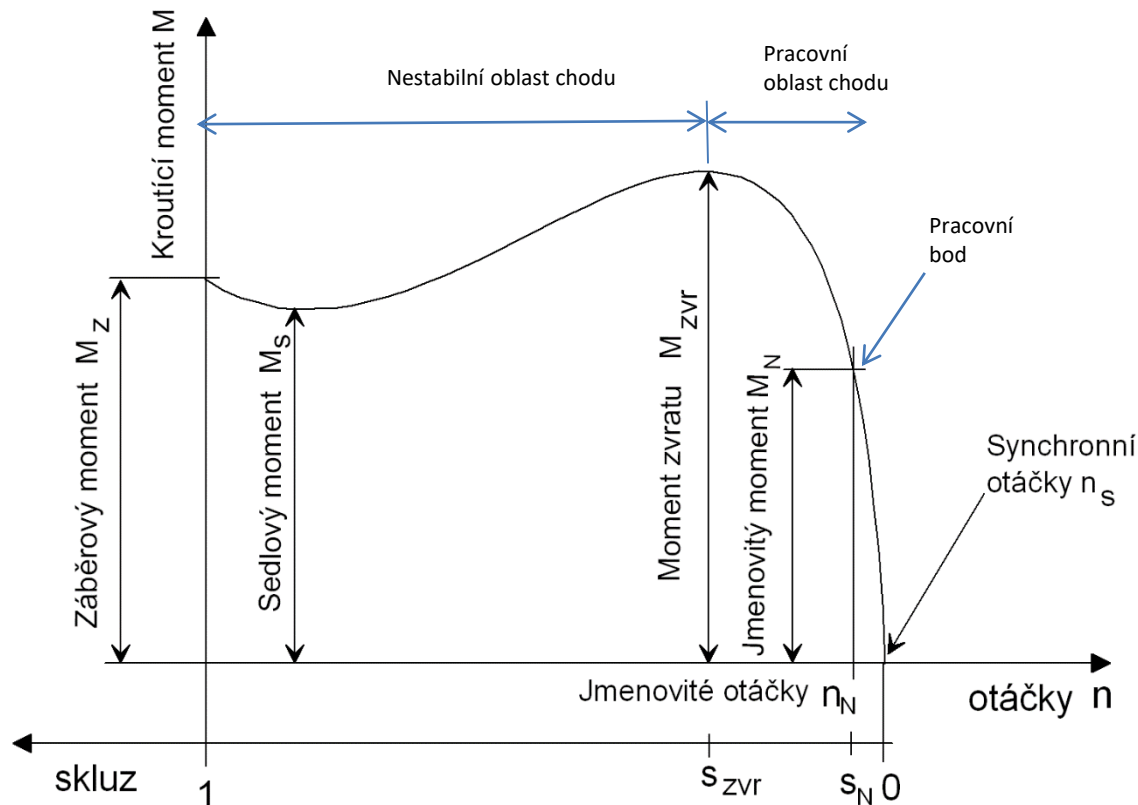
Jmenovitý moment motoru je pak definován poměrem

$$\frac{M_{ZVR}}{M_N} > 1.6$$

a tomu odpovídající otáčky v souladu s označením v grafu platí

$$s_N = \frac{n_s - n_N}{n_N}$$

## Elektropohony s asynchronními motory



*Otáčko momentová charakteristika asynchronního motoru při konstantním napětí statoru a statorové frekvenci*

## Elektropohony s asynchronními motory

Pro otáčky asynchronního motoru platí

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

kde  $s$  skluz;  
 $f$  frekvence napětí statoru;  
 $p$  počet pólových dvojic (pól párů) statoru.



## Elektropohony s asynchronními motory

Z uvedeného vztahu

$$n = (1 - s) \cdot \frac{60 \cdot f}{p}$$

vyplývají možnosti řízení počtu otáček:

1. **Regulace změnou skluzu** - všechny užívané typy regulace jsou pro aplikace v automatizaci nevhodné.
2. **Změnou počtu pólových dvojic** - lze provádět pouze skokovou regulaci, většinou ve dvou stupních, přepínáním počtu pól párů (např. motor 4APB 63 - 42 má jmenovité otáčky 1370 resp. 2840 min<sup>-1</sup>);
3. **Změnou napájecího kmitočtu** – dnes nejčastější.

## Elektropohony s asynchronními motory

### Parametry asynchronních motorů

Označení motoru	Výkon motoru [W]	Počet pólů	Jmenovité otáčky motoru [ $\text{min}^{-1}$ ]	$M_{zvr}/M_N$
4 APB 80 - 2	1100	2	2840	1,95
4 APB 80 - 4	750	4	1380	1,60
4 APB 80 - 6	550	6	910	2,00
4 APB 80 - 8	250	8	690	2,00

## Elektropohony s asynchronními motory

Regulace otáček změnou napájecího kmitočtu:

- **tyristorové měniče** (pro velké výkony),
- **tranzistorové měniče** pro motory s výkony 0,25 - 50 (80) kW (nejčastěji).

Řada renomovaných výrobců (Siemens, Lenze, Baumühle, Nord, Renold, Brothers, Fanuc, Panasonic a další) dodává **širokou škálu frekvenčních měničů s vysokým stupněm vybavenosti**.

I nejjednodušší frekvenční měniče bez zpětné vazby dovolují **programovat širokou škálu obslužných funkcí** (např. rozběhové a brzdové rampy, je možné připojit a programovat externí vstupy, umožňující předvolbu žádaných frekvencí a jejich přepínání na základě vnějších logických signálů).

Při aplikacích pohonů s frekvenčními měniči je nutné respektovat pracovní oblasti stanovené **mezními charakteristikami**, které vymezují oblast pro trvalý provoz.

## Elektropohony s asynchronními motory

### Technická data frekvenčních měničů firmy Lenze

Typ měniče Parametr	Lenze 8100	Lenze 8600
Výstupní výkon	0,76 ...3,6 kVA	1,9 ... 72,0 kVA
Jmenovitý výkon motoru	0,25 ...2,20 kW	1,1 ... 55,0 kW
Jmenovitý proud měniče	2,0 ...9,5 A	2,9 ...
Maximální proud měniče	3,2 ...11,4 A	4,7 ...176 A
Připojovací napětí	1x 230 V	3 x 400 V
Frekvence sítě	50/60 Hz	50/60 Hz
Výstupní napětí	3 x 0 V ... až Usítě	3 x 0 ... až Usítě
Výstupní frekvence	0 ... 480 Hz	0 ... 480 Hz

## Elektropohony s DC motory

DC motor je jedním ze stejnosměrných motorů, které převádějí stejnosměrnou elektrickou energii na mechanickou energii.

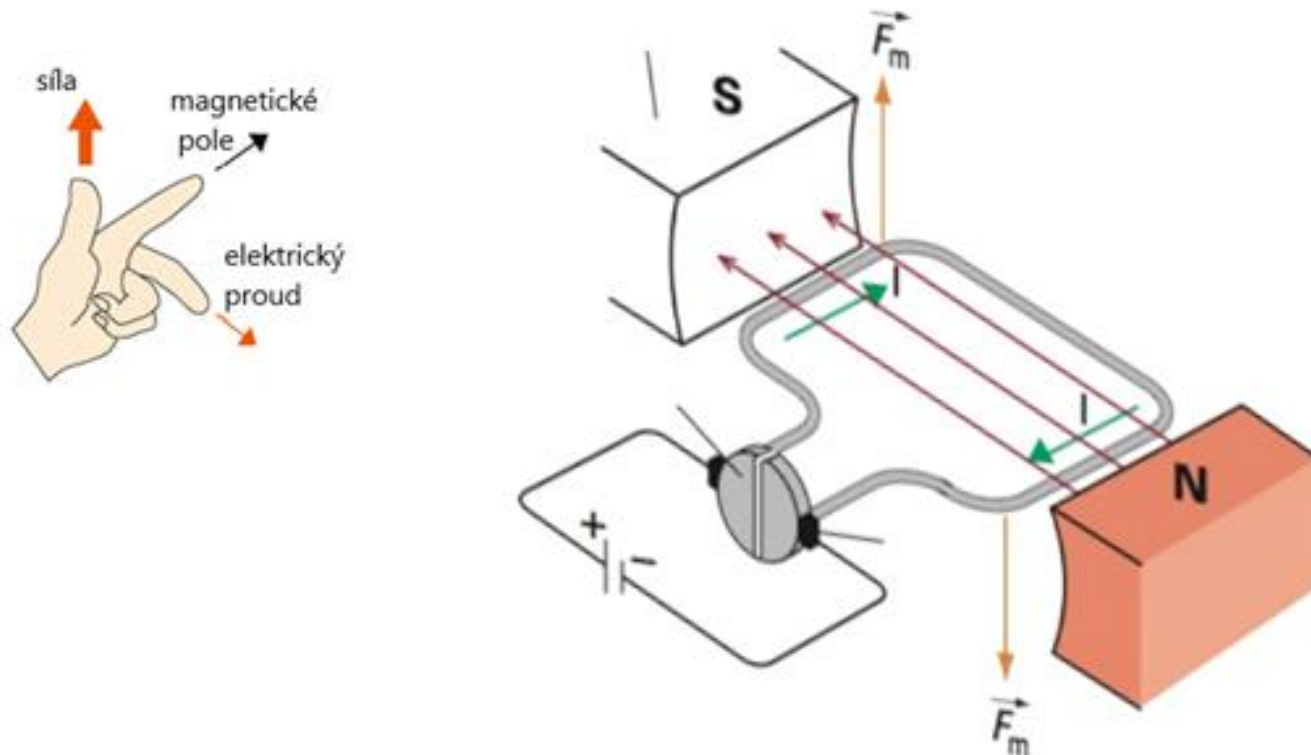
Společným konstrukčním znakem DC motorů je:

- **stator s póly** a
- **rotor** což je kotva s **vinutím**, na které je přiváděno napětí přes komutátor.

[https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=244&v=LAtPHANefQo](https://www.youtube.com/watch?time_continue=244&v=LAtPHANefQo)

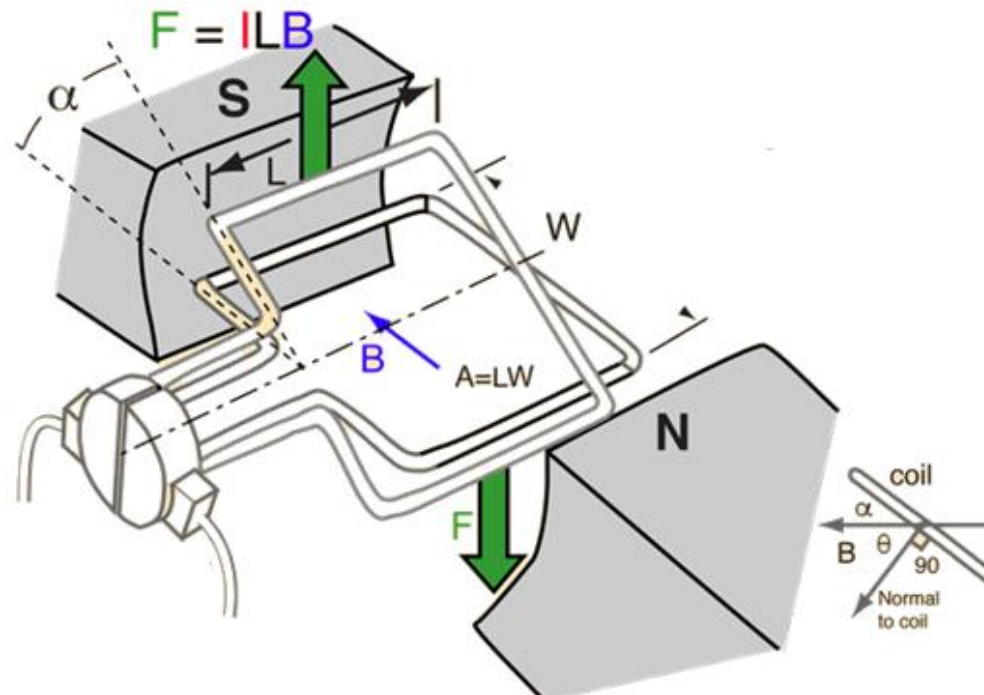
## Elektropohony s DC motory

Princip činnosti stejnosměrného (DC) motoru lze jednoduše ukázat rozborem chování proudové smyčky umístěné v magnetickém poli permanentního magnetu.



## Elektropohony s DC motory

Je-li k proudové smyčce v magnetickém poli připojeno stejnosměrné napětí, bude působit na větev smyčky bližší jižnímu pólu magnetu podle Flemingova pravidla levé ruky síla směrem nahoru, na druhé větvi síla směrem dolů, tyto dvě síly vyvolají moment síly, který způsobí natáčení smyčky.



## Elektropohony s DC motory

Pro vyvozenou sílu platí

$$F = ILB$$

kde  $I$  proud,  
 $L$  délka vodiče (šířka smyčky),  
 $B$  magnetická indukce.

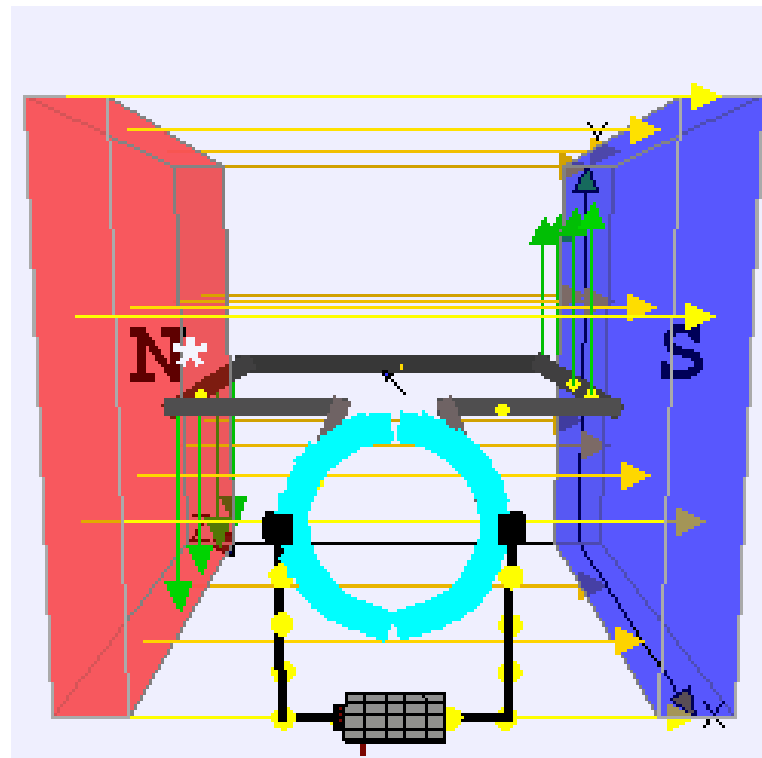
Velikost působící síly závisí na úhlu mezi normálou smyčky a magnetickou indukcí (vektorový součin), pak výsledný působící moment magnetické síly na obdélníkovou smyčku bude mít podle vztahu přibližně sinusový průběh

$$M = BIA \sin\alpha$$

kde  $A$  plocha smyčky ( $L.W$ ),  
 $\alpha$  úhel natočení.



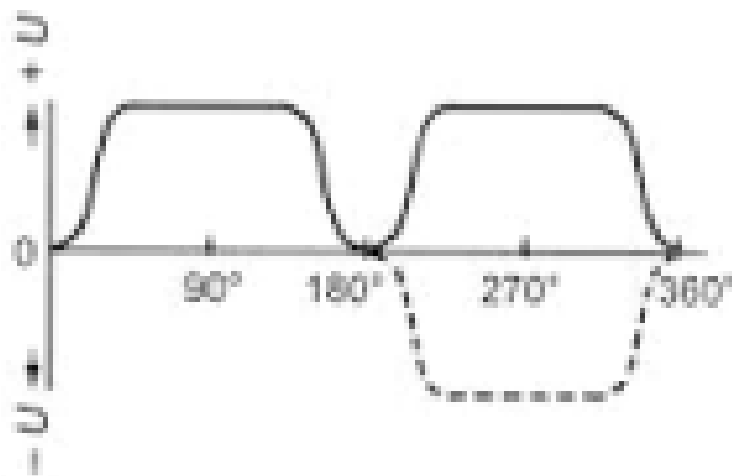
## Elektropohony s DC motory



By Lookang many thanks to Fu-Kwun Hwang and author of Easy Java Simulation = Francisco Esquembre - Own work <http://iwant2study.org/ospag/index.php/interactive-resources/physics/05-electricity-and-magnetism/09-electromagnetic-induction/313-ejs-model-dcmotor10>, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=15736309>.

## Elektropohony s DC motory

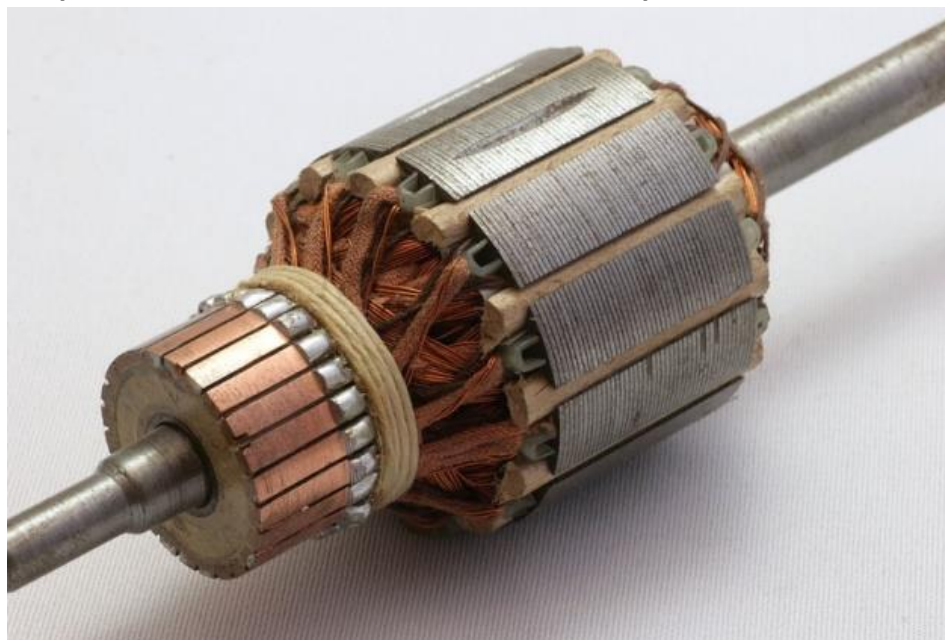
Napětí je ke smyčce připojeno tak, aby fungovalo za pohybu přes izolované půlkroužky pomocí kartáčů a tzv. komutátorem je realizována změna napájení tak, že se změní smysl proudu a tím je docíleno působení točivého momentu na stejnou stranu.



## Elektropohony s DC motory

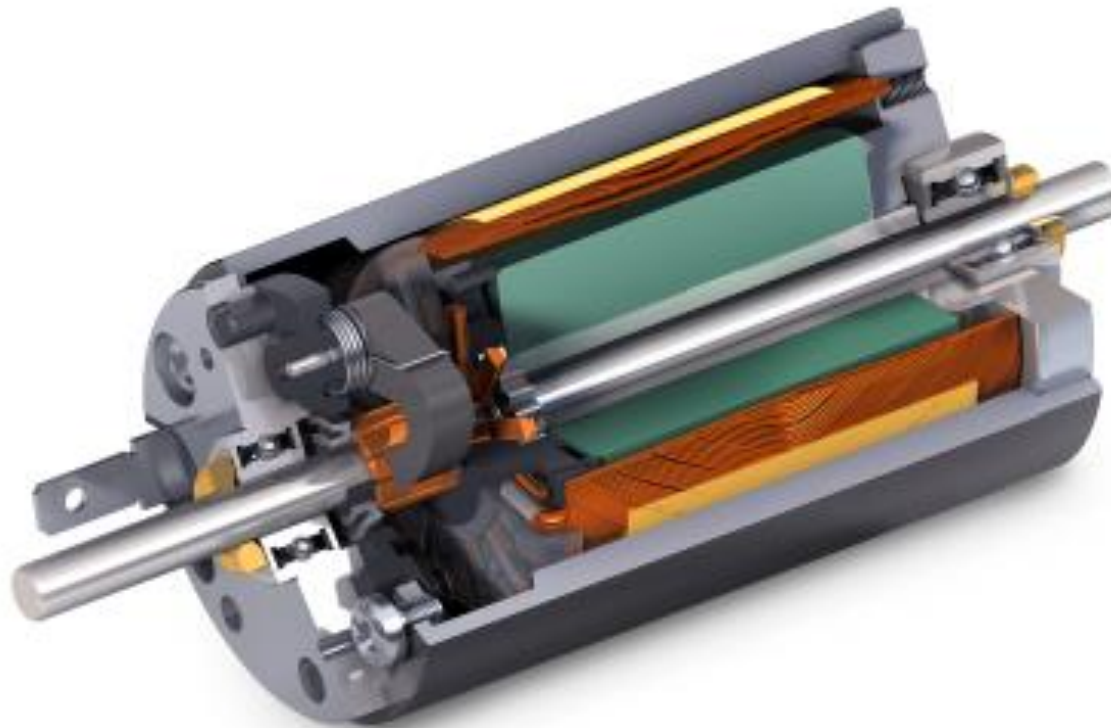
Rotor (kotva) nese v drážkách **rozložené vinutí s cívkami**, vyvedenými k lamelám **mechanického komutátoru**.

Ten přivádí **správně orientovaný proud do cívek vinutí rotující kotvy** tak, aby všechny proudem protékané cívkové strany vytvářely v magnetickém poli hlavních pólů **točivý moment souhlasného smyslu**.



## Elektropohony s DC motory

Ke komutátoru přiléhají kartáče z grafitu s otočným, popř. posuvným pohybem dotlačované do kontaktu pružinou



## *Elektropohony s DC motory*

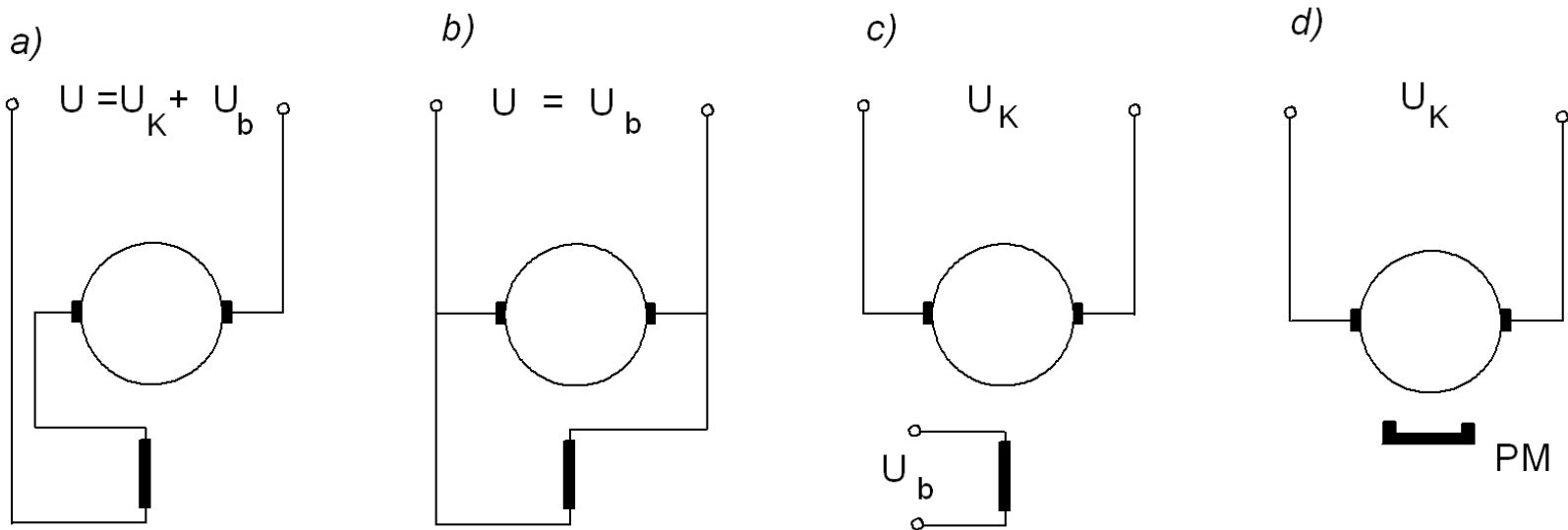
Společným konstrukčním znakem DC motorů je stator s póly a rotorem je kotva s vinutím, na které je přiváděno napětí přes komutátor.

V zásadě je nutné rozlišit motory:

- sériové;
- derivační;
- s cizím buzením;
- s permanentními magnety.

Tyto motory se liší vnitřním zapojením a vlastnostmi.

## Elektropohony s DC motory



*Schéματα základních typů DC elektromotorů: a – sériový motor, b – derivační motor, c – motor s cizím buzením, d – motor s buzením permanentními magnety*

## Elektropohony s DC motory – řízení pohybové frekvence

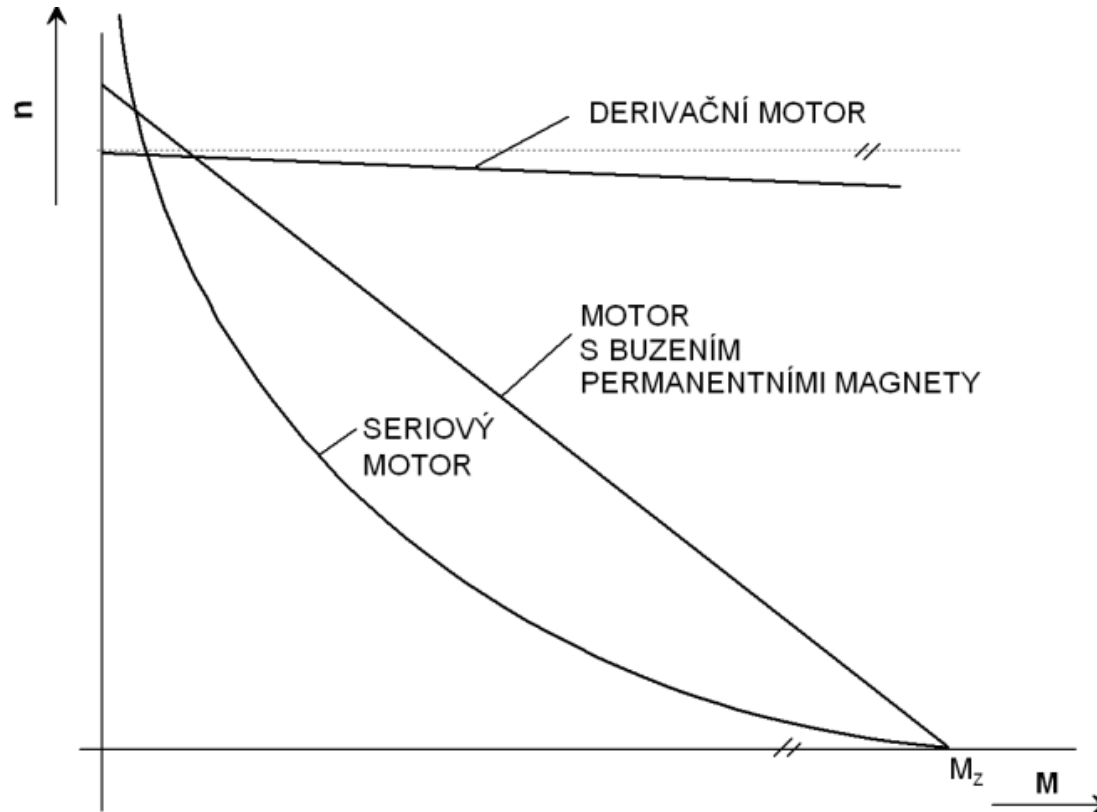
Nejrozšířenějším způsobem řízení pohybové frekvence DC motorů je řízení změnou napětí v obvodu kotvy.

Pro jednotlivé typy motorů se regulační možnosti a vlastnosti pohonů liší, zde je pro připomenutí uvedena základní charakteristika:

Sériový motor - vhodný pro velké záběrové momenty, má měkkou charakteristiku a nesmí pracovat nezatížený (nebezpečí poškození kotvy) – nejčastější aplikace jako spouštěč (startér) automobilů.

Motory s paralelním buzením (derivační) - motory mají velmi tvrdou charakteristiku (otáčky se pouze nepatrně mění se zatížením – max. o 5 – 10 %). Otáčky se regulují především změnou napětí kotvy, případně přes zařazený reostat změnou budícího napětí.

## Elektropohony s DC motory – řízení pohybové frekvence



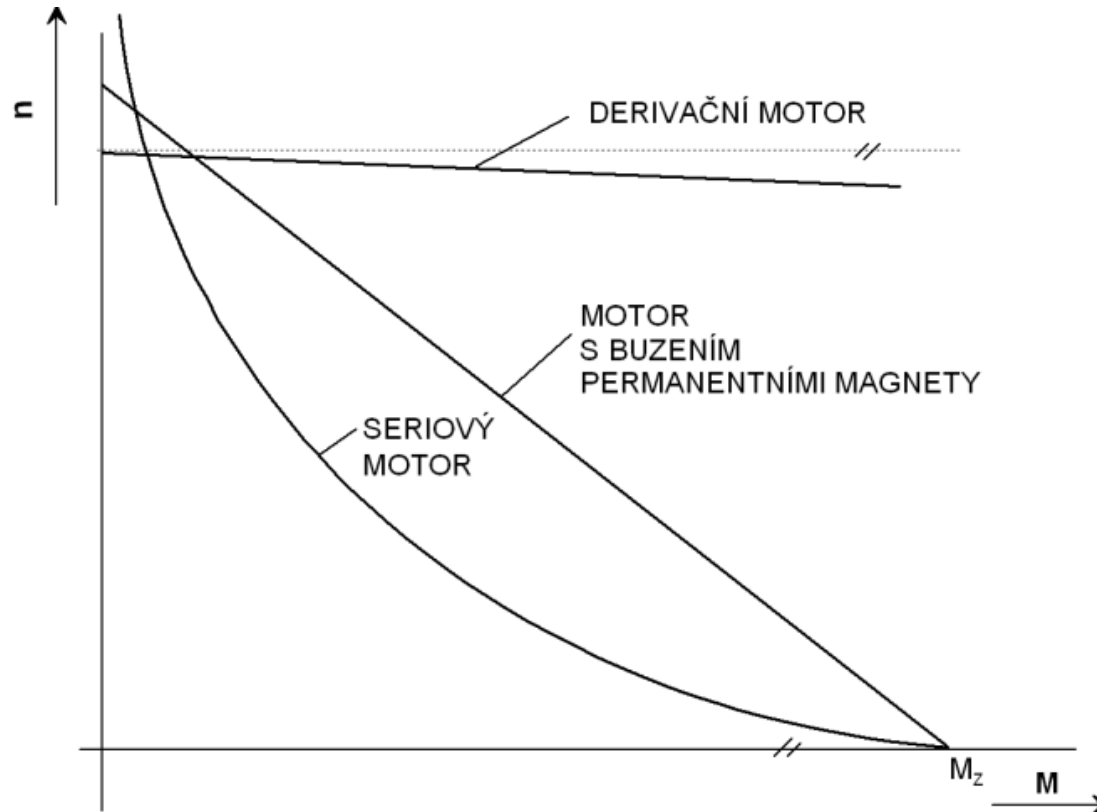
*Porovnání momentových charakteristik DC motorů*



## *Elektropohony s DC motory – řízení pohybové frekvence*

*Motory s cizím buzením* - mají **podobné vlastnosti jako derivační**, jsou vhodné pro **hospodárné řízení pohybové frekvence**. Magnety se budí **konstantním napětím a kotva se napájí proměnným napětím**. Mají **široký regulační rozsah** a dostatečně **tvrdou momentovou charakteristiku** a **dobré dynamické vlastnosti**. Pro PR se aplikují výjimečně - mají nižší měrný výkon oproti motorům s permanentními magnety.

## Elektropohony s DC motory – řízení pohybové frekvence



*Porovnání momentových charakteristik DC motorů*

## Elektropohony s DC motory – řízení pohybové frekvence

Motory s permanentními magnety - budící vinutí ve statoru je nahrazeno permanentními magnety. Svými vlastnostmi tvoří tyto motory **přechod mezi sériovým a derivačním motorem**, protože má poněkud měkčí charakteristiku. Pro **aplikace u PR jsou nejvhodnější** a nejčastěji užívané motory.

### Výhodné vlastnosti:

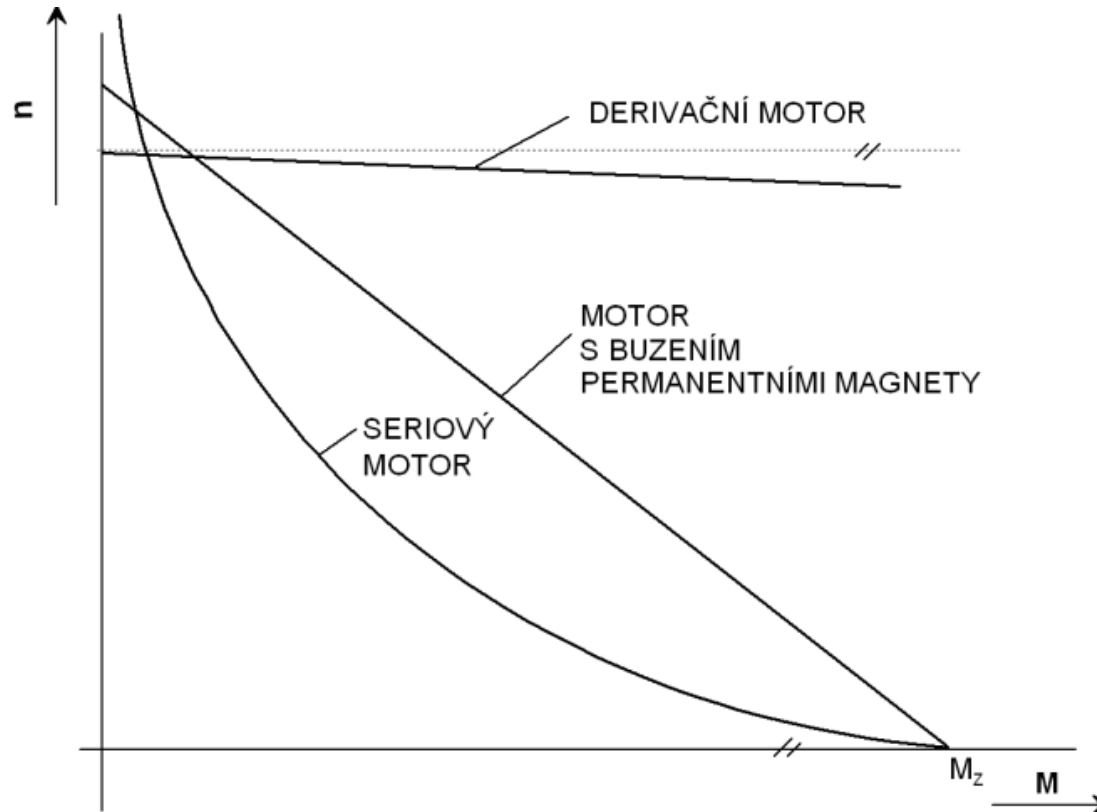
- vysoký záběrový moment;
- lineární závislost momentu na rychlosti otáčení;
- velmi dobré dynamické vlastnosti;
- odpadá budící vinutí, motor je menší, lehčí, konstrukčně jednodušší (má vyšší měrný výkon);
- nové materiály permanentních magnetů zlepšují charakteristiku motoru, přičemž klasické slitiny (Al - Ni - Co) jsou nahrazovány magnety ze vzácných zemin s velkou koercivní silou, nejlepší Samarium - Kobalt (Sm - Co), levnější Praseodym - Kobalt nebo Železo - Neodym - Bór.

## *Elektropohony s DC motory – řízení pohybové frekvence*

*Nevýhodou DC motorů s permanentními magnety jsou:*

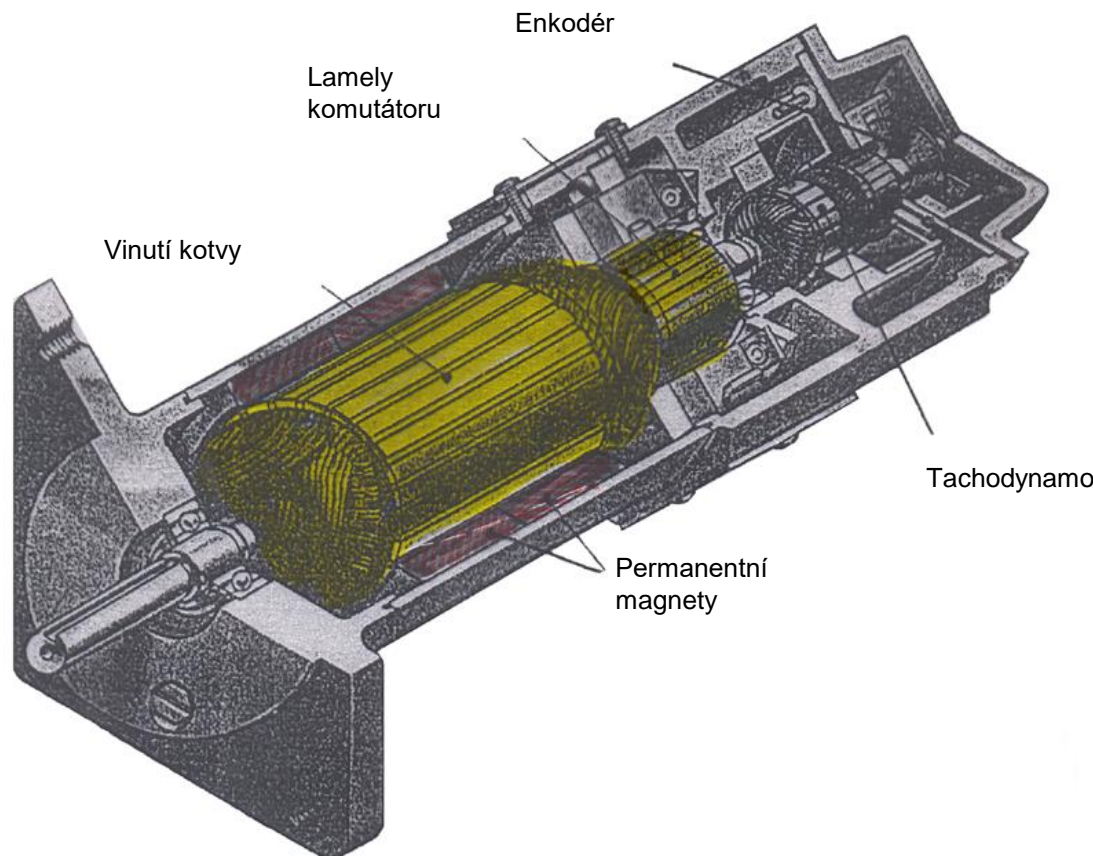
- závislost na teplotě z důvodů velkého tepelného odporu a špatného chlazení;
- jiskření komutátoru - opotřebení a opalování kartáčů.

## Elektropohony s DC motory – řízení pohybové frekvence



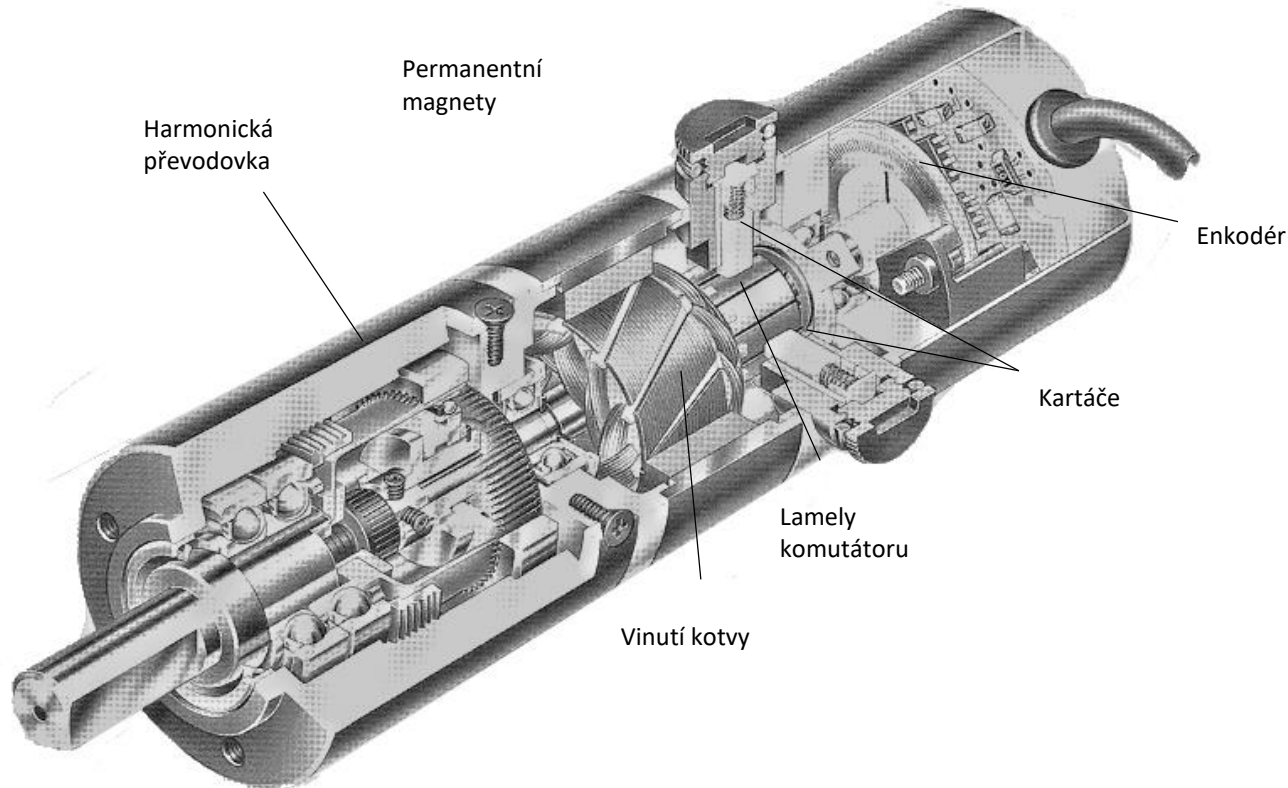
*Porovnání momentových charakteristik DC motorů*

## Elektropohony s DC motory – **Motory s permanentními magnety**



*Řez typickým DC servomotorem se snímačem otáček (tachodynamo) a snímačem polohy (inkrementální čidlo)*

## Elektropohony s DC motory – Motory s permanentními magnety



*DC servopohon s diskovým motorem a harmonickou převodovkou*

## Elektropohony s DC motory

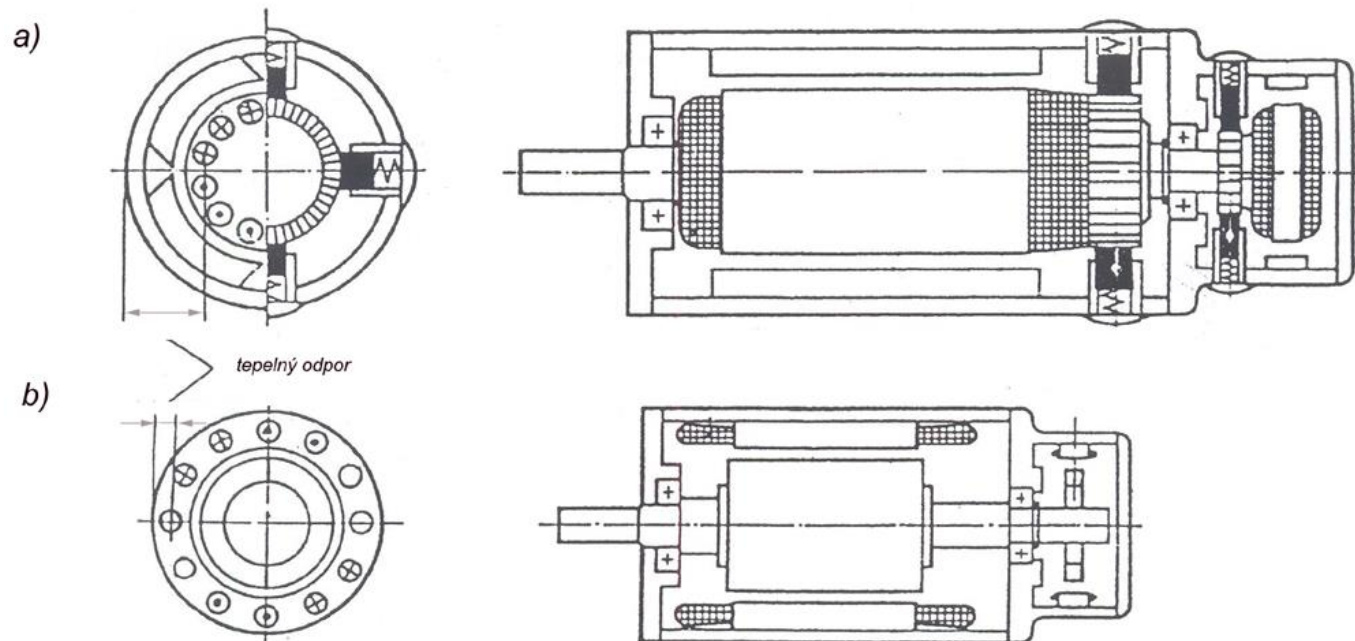
U dnes nasazených robotů jsou stále DC servopohony široce používány, avšak v současné době **jsou stále častěji nahrazovány modernějšími bezkartáčovými pohony** (BLDC, EC motory).

Hlavní **nevýhody** DC servopohonů jsou spojeny zejména:

- s mechanickou komutací – s přechodovými odpory, napěťovými pulzy a opotřebením komutátorů;
- problematickým chlazením vinutí kotvy, neboť permanentní magnety ve statoru tvoří značný tepelný odpor;
- analogové uspořádání řídicího systému není v souladu s tendencemi digitalizace propojení programovacího CNC řízení a výkonového bloku.



## Elektropohony s DC motory



*Porovnání velikosti kartáčového a bezkartáčového motoru: a – kartáčový (DC motor); b – bezkartáčový (BLDC motor)*

## Elektropohony s bezkartáčovými motory

**Nejmodernější pohony** průmyslové automatizační techniky a průmyslových robotů v současné době.

Pro označení uvedeného typu motorů se užívá termín "**stejnoseměrný bezkartáčový motor – Brushless DC = BLDC**" (BLDC motory), anebo od způsobu komutace "EC motor" (elektronicky komutovaný motor, angl. electronically commutated motor) a nejčastěji se užívá ne zcela správně označení – „AC servomotor“.

[https://www.youtube.com/watch?v=bCEiOnuODac&list=PLuUdFsbOK\\_8qVROrfI2M2WSV2xAz-ABVU&index=8&t=0s](https://www.youtube.com/watch?v=bCEiOnuODac&list=PLuUdFsbOK_8qVROrfI2M2WSV2xAz-ABVU&index=8&t=0s)

## *Elektropohony s bezkartáčovými motory*

Motivací k vývoji těchto motorů byly především snahy o:

- dosažení **vysokých rychlostí**;
- zlepšení **dynamických vlastností** (krácení doby brzdění a akcelerace);
- **zjednodušení údržby**;
- **zmenšení rozměrů**;
- **zvýšení specifického příkonu a**
- **zvýšení spolehlivosti a životnosti.**

## *Elektropohony s bezkartáčovými motory*

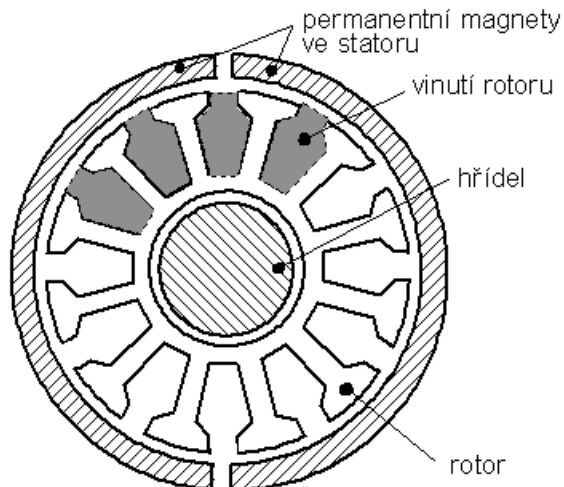
Bezkartáčový motor je **hybrid**, který v konstrukčním provedení kombinuje nejlepší vlastnosti klasických DC kartáčových motorů a asynchronních motorů s kotvou nakrátko.

Princip činnosti vychází z klasického uspořádání DC kartáčových motorů s permanentními magnety, přičemž došlo k **záměně funkce rotoru a statoru**.

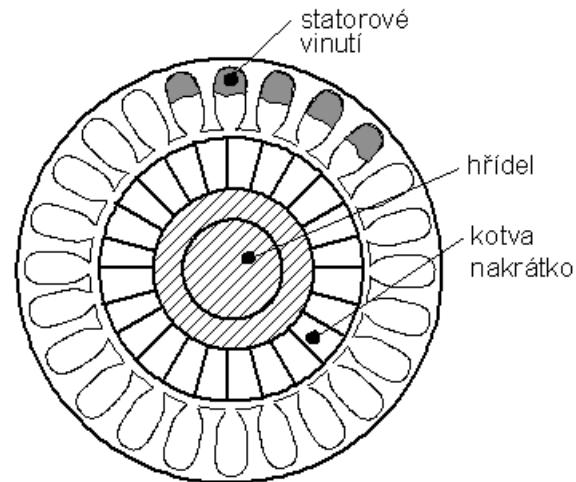
Permanentní magnety jsou umístěné v rotoru a vinutí je ve statoru.

## Elektropohony s bezkartáčovými motory

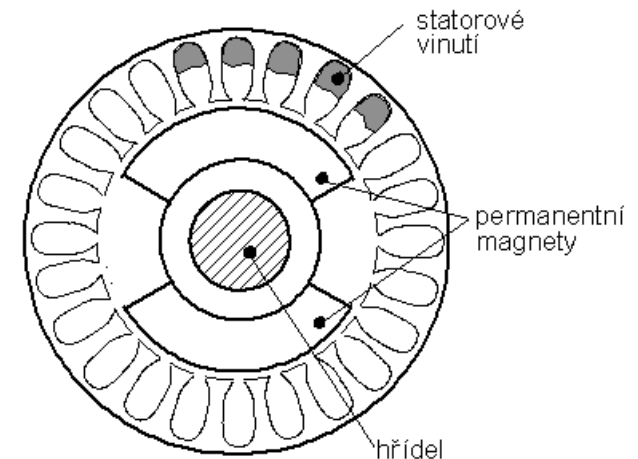
a) DC motor



b) Asynchronní motor



c) Bezkartáčový motor



### Porovnání principů konstrukce motorů (příčný řez)

## Elektropohony s bezkartáčovými motory

Obecně platí, že moment na hřídeli motoru je úměrný vektorovému součinu magnetických indukcí statoru  $\vec{B}_S$  a rotoru  $\vec{B}_R$

$$\vec{M}_K = k \cdot (\vec{B}_S \times \vec{B}_R)$$

, a také

$$|\vec{M}_K| = k \cdot |\vec{B}_S| \cdot |\vec{B}_R| \cdot \sin \gamma$$

kde  $\gamma$  je vzájemný úhel obou vektorů.

## *Elektropohony s bezkartáčovými motory*

Stejného účinku jako u komutátorového motoru bude dosaženo v případě, že **permanентní magnety budou umístěny v rotoru a proud bude přepínán do cívek statoru.**

Vinutí statoru bezkartáčového motoru je provedeno většinou třemi shodnými cívkami statoru.

Mechanické spínání komutátorem je v případě bezkartáčového motoru nahrazeno elektronickým, pomocí spínacích tranzistorů – elektronickou komutací.

Spínání tranzistorů musí být odvozeno od okamžité polohy rotoru vůči statoru tak, aby platilo

$$\gamma = 90^\circ$$

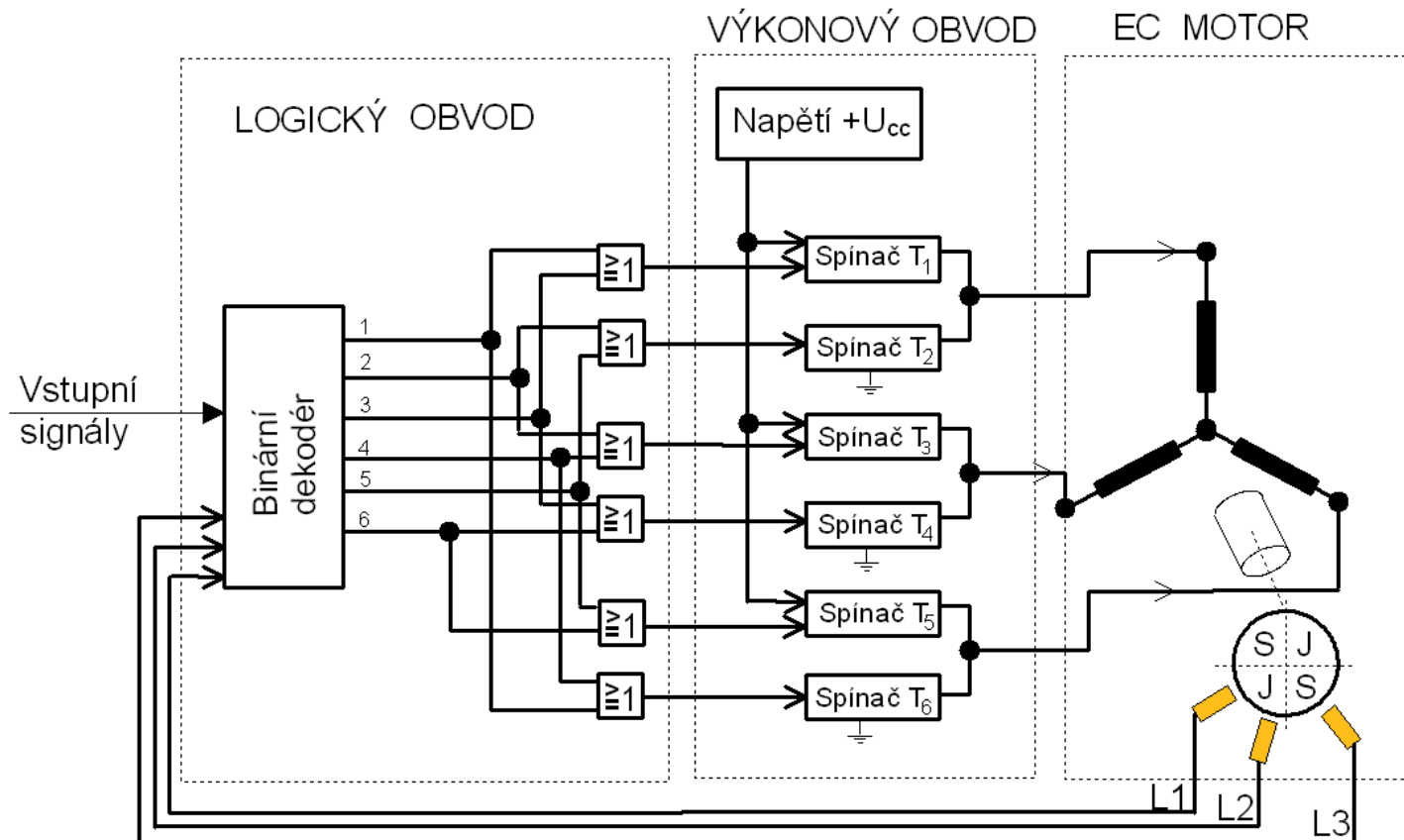
## *Elektropohony s bezkartáčovými motory*

Řízení BLDC motoru je rozděleno do tří částí:

- logický obvod,
- výkonový obvod a
- vlastní BLDC motor vybavený snímači poskytujícími **informace o okamžité poloze rotoru** (buď Hallovy sondy, rezolver anebo jednoduchý optoelektronický snímač).



## Elektropohony s bezkartáčovými motory

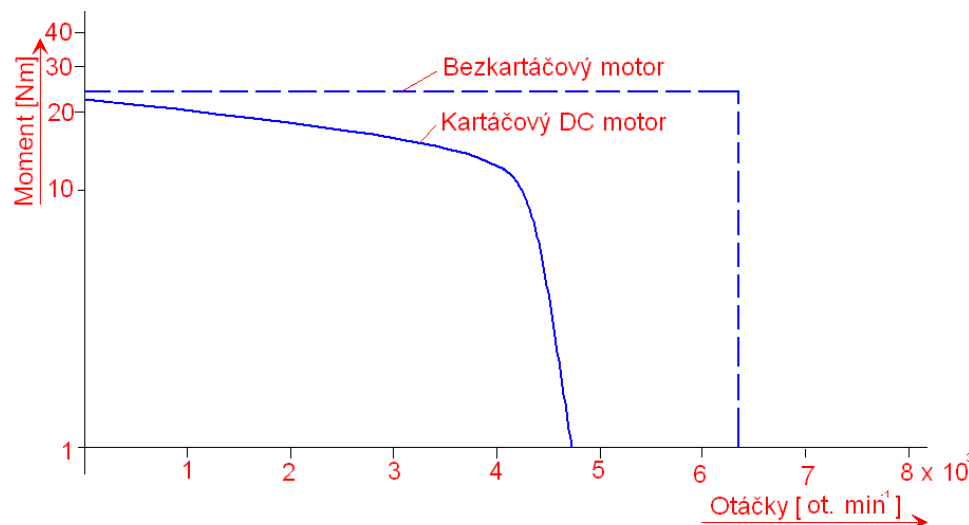


Zjednodušené blokové schéma regulace BLCD motoru

## Elektropohony s bezkartáčovými motory

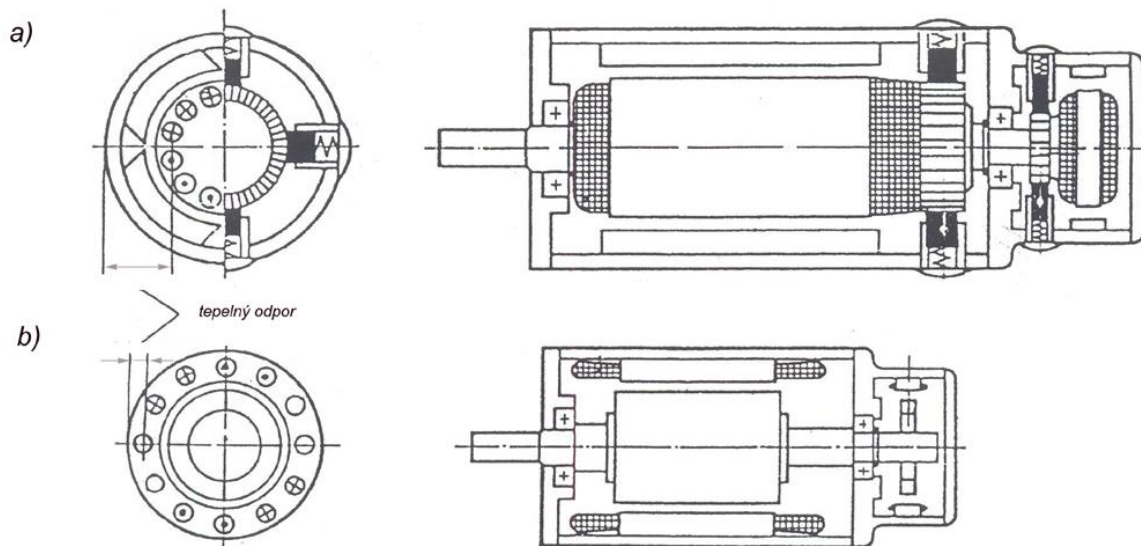
Výhodnost BLDC motorů v konstrukcích pohonů robotů lze shrnout takto:

1. **Odpadá mechanický komutátor** a obtíže s ním spojené (nutnost údržby, opotřebení a následkem toho malá životnost). BLDC motory mají životnost prakticky omezenou pouze životností ložisek (cca 30 000 provozních hodin), mají klidný chod **bez akustických efektů**;
2. Elektrická komutace umožňuje vyvinout **maximální moment i při maximálních otáčkách**, takže nedochází k omezování výkonu.



## Elektropohony s bezkartáčovými motory

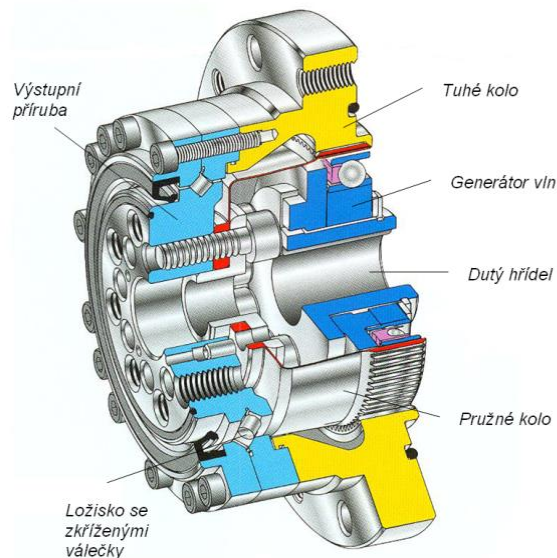
- Motor má **lepší chlazení**, protože tepelné ztráty vznikají ve statoru a odvod tepla je možný s menším tepelným odporem.
- Důsledkem odstranění komutátoru, dobrého chlazení a vyšší momentové přetížitelnosti jsou **menší rozměry a úspora hmotnosti**.



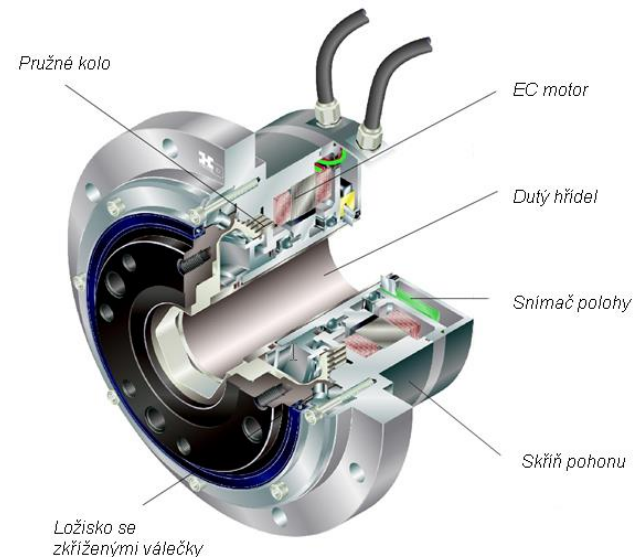
## Elektropohony s bezkartáčovými motory

5. Pohony robotů se realizují v kombinaci rychloběžného motoru a převodovky do pomala a častá je aplikace bezkartáčových motorů v **kompaktním provedení s harmonickou převodovkou** vestavěnou do motoru.

a) Příklad konstrukčního řešení HD



b) Elektrický pohon se zkrácenou převodovkou



I

## *Elektropohony s krokovými motory*

Výrazné zlepšování **technických parametrů** pohonů s krokovými motory, tj. inovace a zvyšování technických parametrů krokových motorů samotných, ale zejména **ovládací elektroniky**, umožňuje rozšíření aplikací těchto pohonů ve stavbě automatizačního zařízení a v konstrukci účelových robotů.

Aplikace pohonů s krokovými motory v konstrukcích PR a manipulátorů je podmíněna jejich přednostmi s respektováním nevýhodných vlastností.

<https://www.youtube.com/watch?v=eyqwLiowZiU>

## *Elektropohony s krokovými motory*

### Výhodné vlastnosti:

- **vysoká přesnost polohování** (jsou dosažitelné hodnoty velikosti kroku);
- **jednoduché propojení s číslicovým zařízením;**
- **možnost práce v otevřené smyčce** (bez zpětné vazby);
- **příznivý poměr mezi cenou a technickými parametry.**

## Elektropohony s krokovými motory

### Nevýhodné vlastnosti:

- **nesnese přetížení** (přetížení vede k porušení synchronizace s řídicími pulzy);
- jsou vyráběny pro **poměrně nízké hodnoty momentů** ( $M_n = 0,2 - 10 \dots 15$  Nm);
- mají **nízkou hodnotu měrného momentu**  $\frac{M_{\max}}{m} = 0,5 \div 0,8 \dots (0,9) \text{ Nm/kg}$ .
- **dynamické vlastnosti se mění** a výrazně zhoršují s velikostí momentu setrvačnosti připojené zátěže.

## *Elektropohony s krokovými motory*

Krokové motory (KM) mají poměrně jednoduchou vnitřní strukturu: **řídící impulzy se převádějí přímo na změnu polohy výstupu (rotoru) krokového motoru v přesně definovaném poměru k počtu pulzů.**

**Reverzace pohybu:**

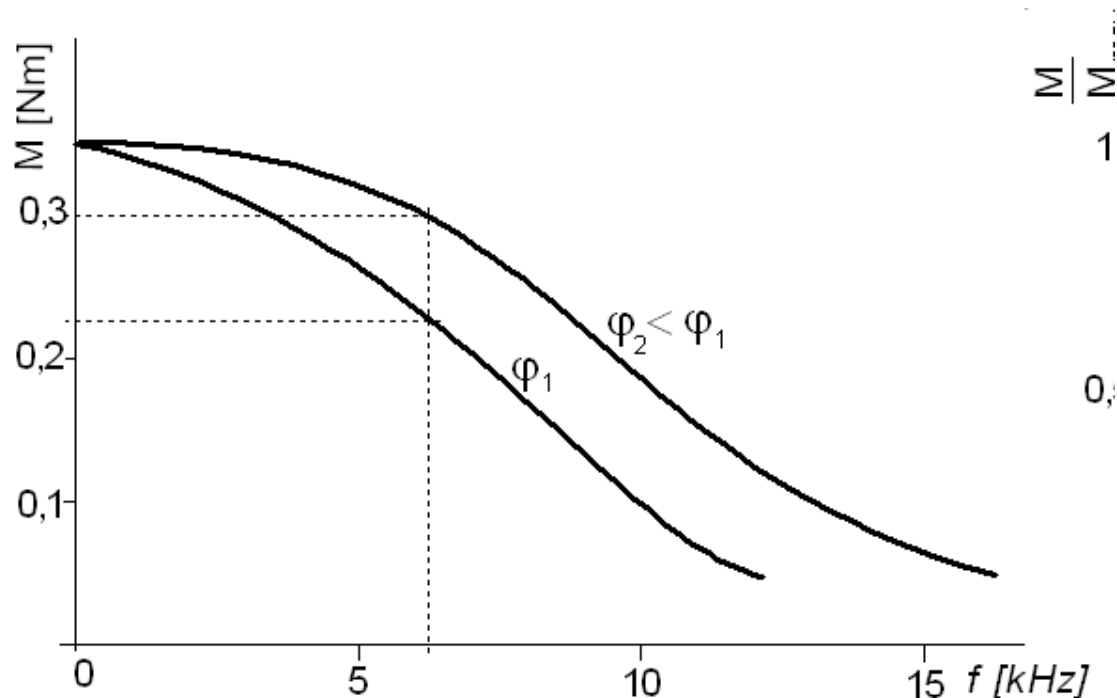
- změna sledu impulzů do jednotlivých fází.

**Rychlost je přímo úměrná frekvenci impulzů.**



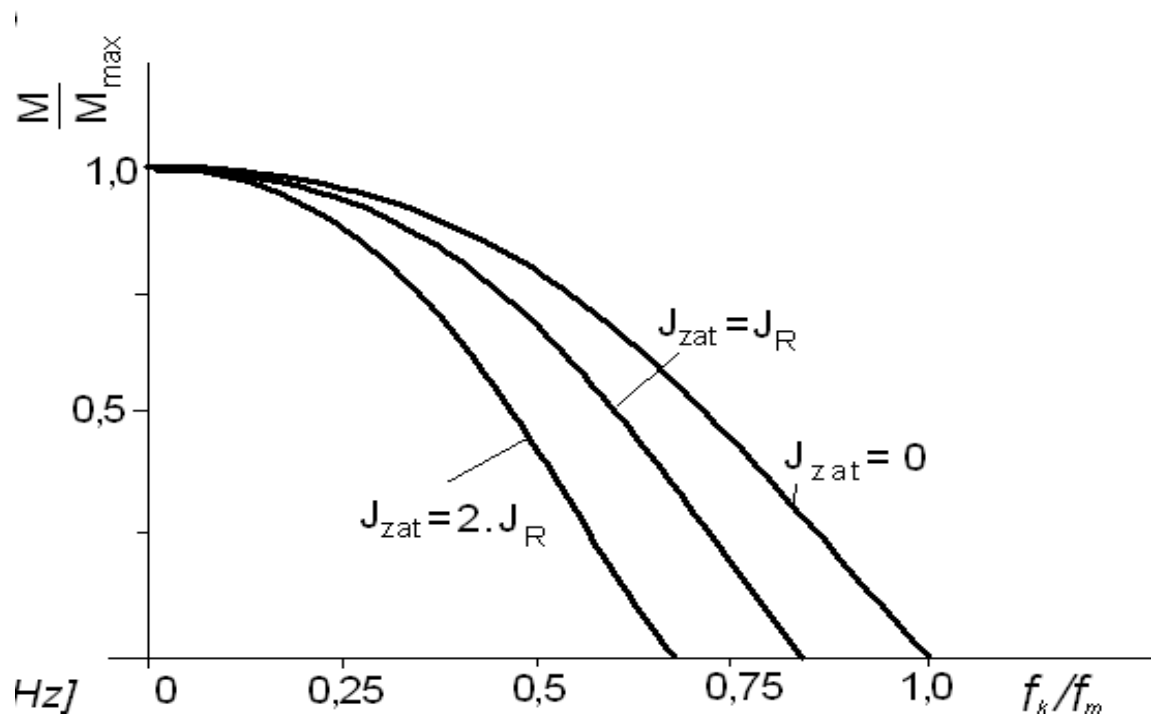
## Elektropohony s krokovými motory – charakteristika

Charakteristiky krokového motoru pro dva krokové motory s odlišnou velikostí kroku  $\varphi_1, \varphi_2$ . Z hlediska aplikace pohonu se chová KM s menší velikostí kroku lépe, protože dovoluje při zvolených otáčkách odebrat větší kroučící moment bez porušení synchronizace (bez ztráty kroku).



## Elektropohony s krokovými motory – charakteristika

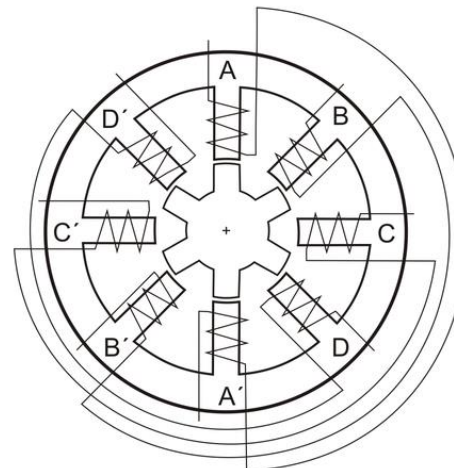
Závislost momentu na hřídeli motoru na frekvenci kroků pro různé velikosti momentu setrvačnosti vnější zátěže. Z charakteristiky je zřejmé, že zátěž svým momentem setrvačnosti výrazně negativně ovlivňuje chování KM.



## Elektropohony s krokovými motory – *konstrukce*

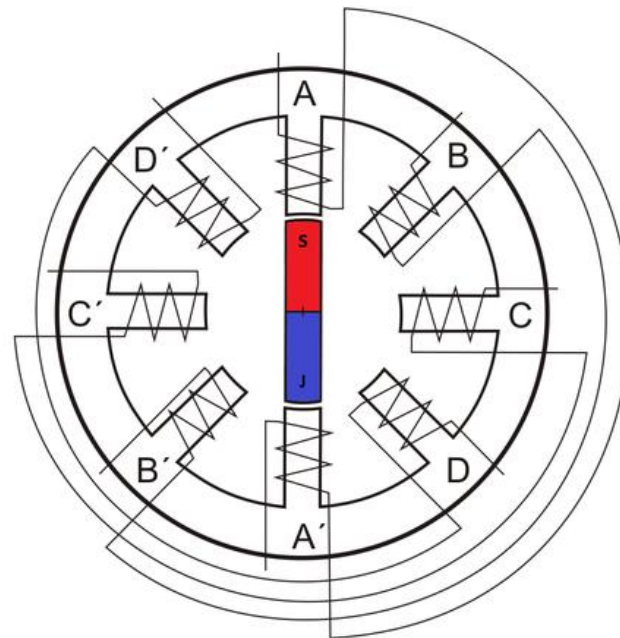
Z hlediska konstrukčního řešení lze rozlišit tři základní koncepce KM:

- **Reakční nebo také reluktanční** (*reluktance = magnetický odpor*) motory využívají schopnosti magnetického obvodu natačet se vždy do mechanické **konfigurace s co nejmenší energií** (co nejmenším magnetickým odporem). Vhodně tvarovaný magnetický obvod se zuby z magneticky vodivého materiálu se vždy natočí těmito zuby pod póly statoru s cívkami (zdroji magnetického toku), aby zvýšil magnetický tok a snížil magnetický odpor (reluktanci) celé konstrukce. Pouštěním proudu do cívek (nejjednodušeji zapínáním a vypínáním cívek) je potom možné s rotorem pohybovat.



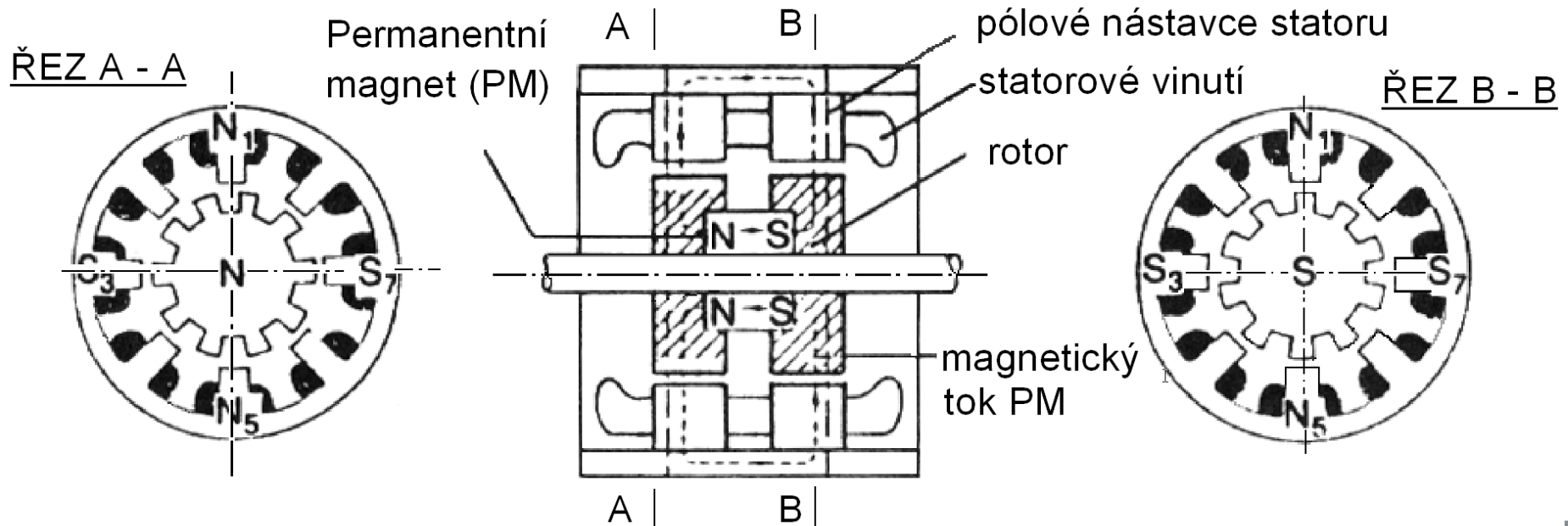
## Elektropohony s krokovými motory – konstrukce

- **Motor s permanentními magnety** využívá magnetického pole vytvořeného permanentními magnety, v magnetickém obvodu se potom objevuje daleko větší magnetický tok a motor je daleko "živější". Severní a jižní póly pak vytvářejí různě směřované toky po celém motoru a vhodným elektrickým proudem se pak motor roztáčí v různém směru.



## Elektropohony s krokovými motory – konstrukce

- Hybridní** znamená, že tento motor v sobě kombinuje dva typy motorů - reluktanční a motor s permanentními magnety. Hybridní krokový motor má vinutí ve statoru, permanentní magnet mezi částmi rotoru a vzduchovou mezeru mezi rotorem a státorem. Kuličková ložiska jsou pak jedinou třecí plochou při otáčení motoru.

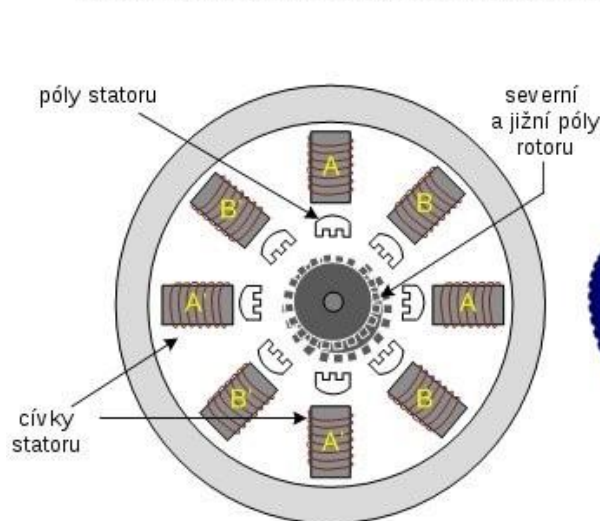


## Elektropohony s krokovými motory – konstrukce

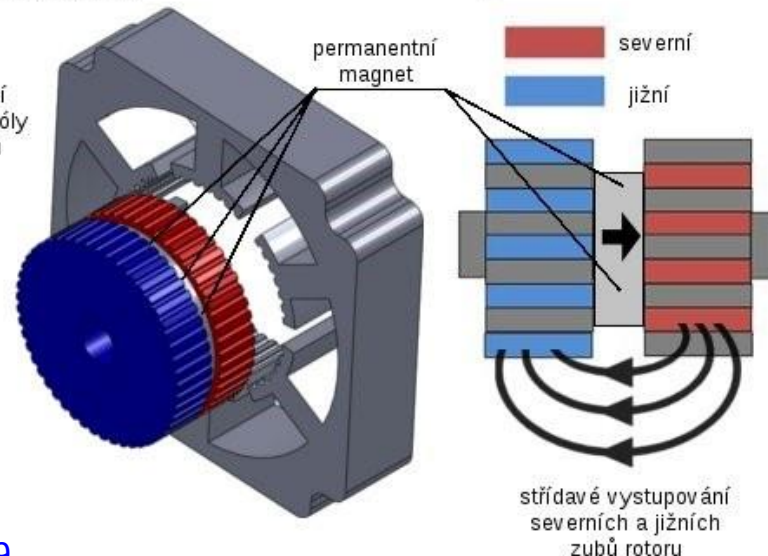
Statorové vinutí je provedeno obdobně jako u reakčních KM a **napájeno stejnosměrným proudem**.

Nejčastější je **bipolární uspořádání**, kdy vinutí každé fáze je rozděleno na **dva protilehlé pólové nástavce** a umožněno paralelní proudové napájení vyšším proudem, a tím je dosaženo větších momentů.

Konstrukce dvojfázového hybridního krokového motoru



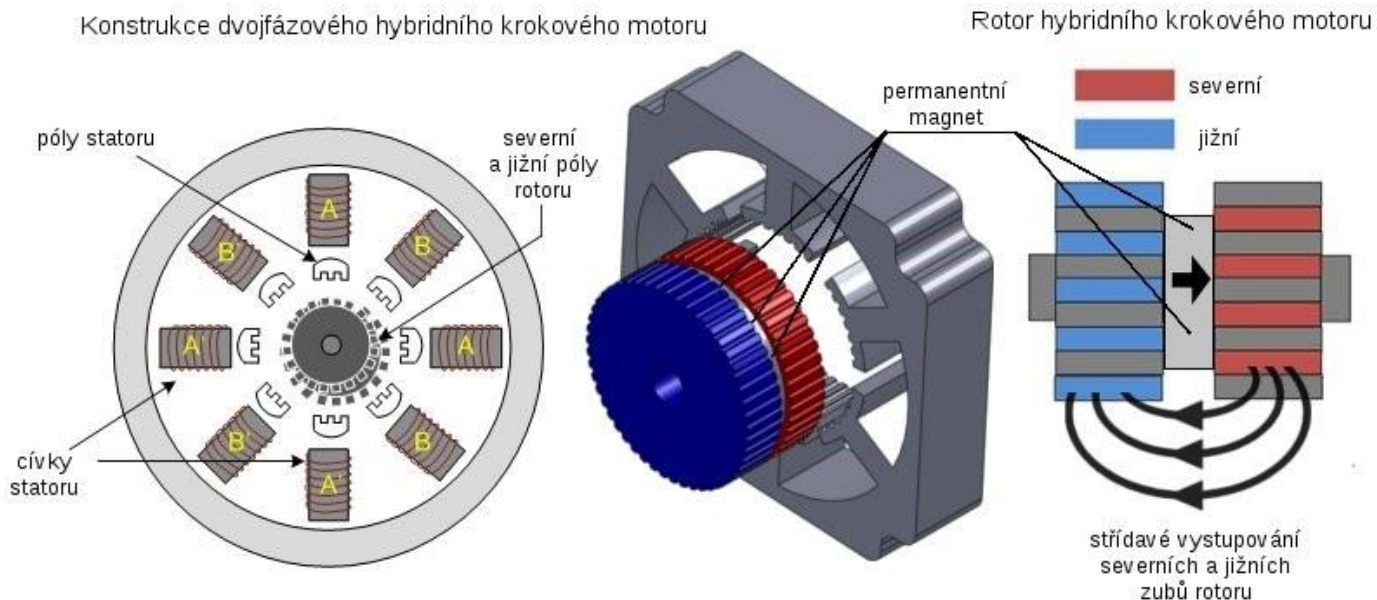
Rotor hybridního krokového motoru



<https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/809>

## Elektropohony s krokovými motory – konstrukce

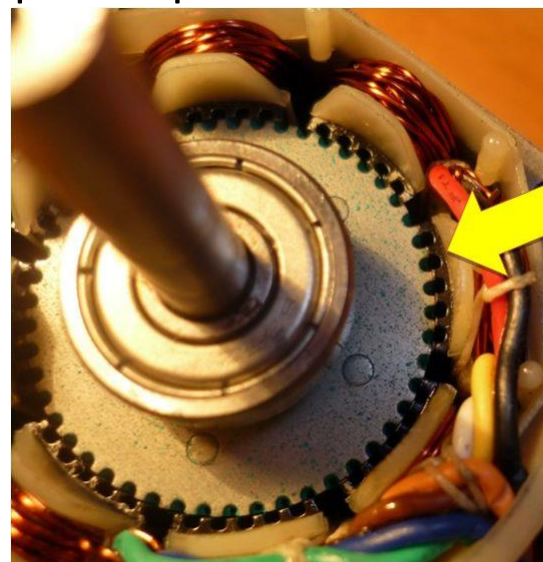
Rotor obsahuje permanentní **magnety zmagnetizované v axiálním směru** a je tvořen dvojicí ozubených kol s ozuby, které tvoří pólové nástavce přesazenými o  $1/2$  zubového dělení.



## Elektropohony s krokovými motory – konstrukce

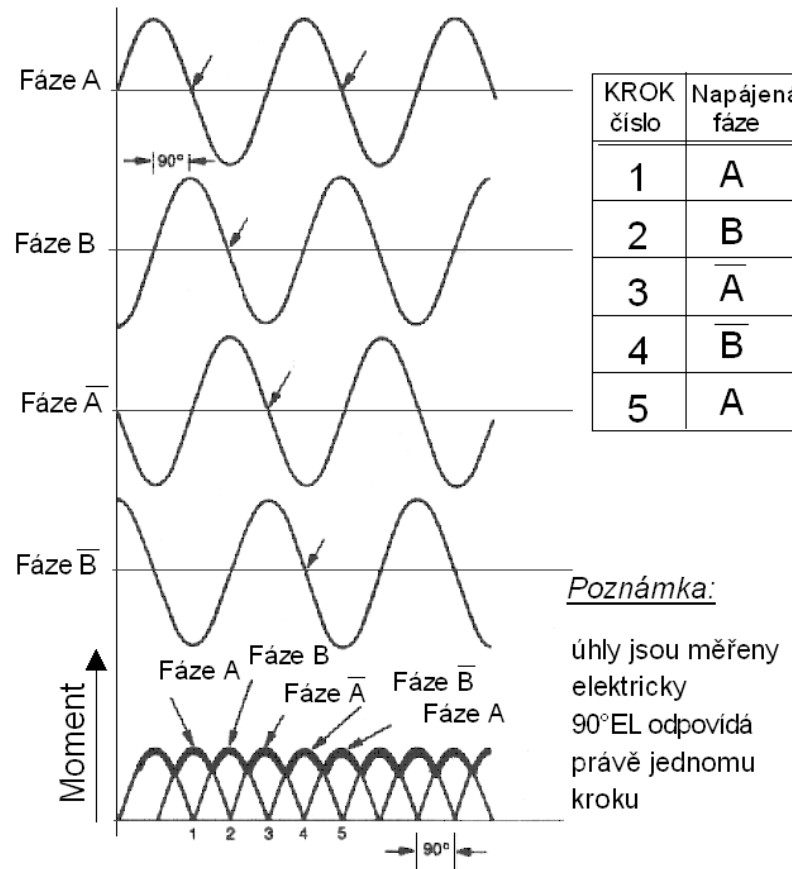
Při proudovém zatěžování jednoho statorového vinutí působí na rotor krouticí moment tak dlouho, až se zuby na statorových pólech a ozuby rotoru dostanou do opozice - přesně proti sobě, tomu také odpovídá magnetické dělení.

Je-li napájeno následující statorové vinutí, dojde k pohybu o další krok. Každému proudovému impulzu odpovídá pootočení rotoru o právě jeden krok.





# Elektropohony s krokovými motory – konstrukce



## Průběh momentů dvoufázového KM

## Elektropohony s krokovými motory – konstrukce

Krokové motory mají možnost, v důsledku rozdílného napájení, pracovat ve dvou režimech chodu:

1. Režim plný krok, u dvoufázových motorů nejčastěji 200 kroků/ot. ( $\sim 1,8^\circ$  na krok).
2. Režim půlkrok - pro dvojfázové KM 400 kroků/ot. ( $\sim 0,9^\circ$  na krok).

Tuto přesnost lze podstatně zvýšit tzv. mikrokrokováním, jehož princip je založen na rozdělení každého kroku na pevný počet mikrokroků. Běžné řídicí jednotky podporují dělení kroku na 16, 32, 64 a 128 mikrokroků - nyní špičkově až 1024 mikrokroků.

## *Elektropohony s KM– konstrukce pětifázových hybridních motorů*

**Pětifázové krokové motory** firmy Berger Lahr jsou podobně jako běžné dvoufázové KM konstruovány jako hybridní a **pracují na principu shodného počtu pólů statoru a rotoru.**

## Elektropohony s KM– konstrukce pětifázových hybridních motorů

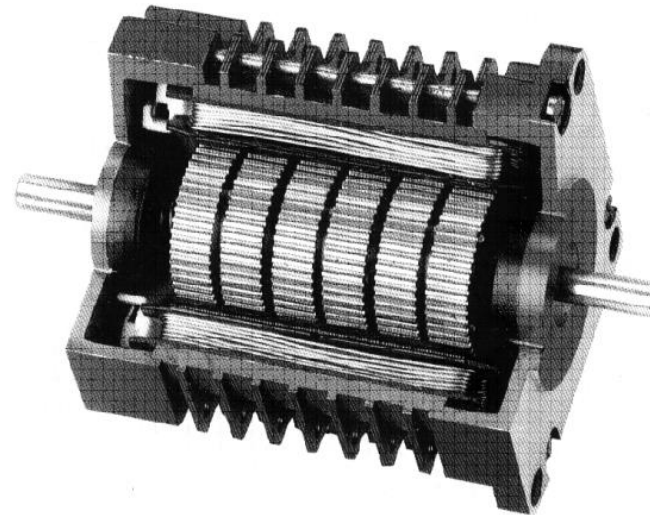
Pět vinutí statoru je rozděleno na 10 hlavních pólů, které jsou opatřeny nástavci s ozuby (vždy 3 drážky a 4 zuby).

Rotor pak obsahuje permanentní magnety zmagnetizované v axiálním směru mezi dvojicí ozubených kol s pólovými ozuby (vždy s 50 zuby).

a) Příčný řez státorem (bez vinutí)



b) Řez krokovým motorem VRDM



## *Elektropohony s KM– konstrukce pětifázových hybridních motorů*

Toto uspořádání dává po obvodu 50 bipólů ( $p = 50$ ) a při  $m = 5$  fázích dostaneme v režimu napájení pro plný krok  $\kappa = 1$  počet  $s_K = 2mp\kappa = 500$  kroků na otáčku ( $0,72^\circ$  plný krok) a v režimu napájení pro půlkrok, kde  $\kappa = 2$  pak bude dvojnásobek, tj.  $s_K = 1\,000$  kroků na 1 otáčku rotoru ( $0,36^\circ$  půlkrok).

Navíc je dosahováno vysoké přesnosti polohování, která činí 3´.

## *Elektropohony s krokovými motory*

Nejmodernější konstrukce KM jsou **motory s třífázovým vinutím a napájením řešeným pomocí sinusové komutace** (firma SIG Positec), které dovolují pracovat jako dvoufázové (200, resp. 400 kroků/ ot.), popř. pětifázové (500, resp. 1000 kroků/ ot.) s plnou aplikací techniky mikrokrokování.

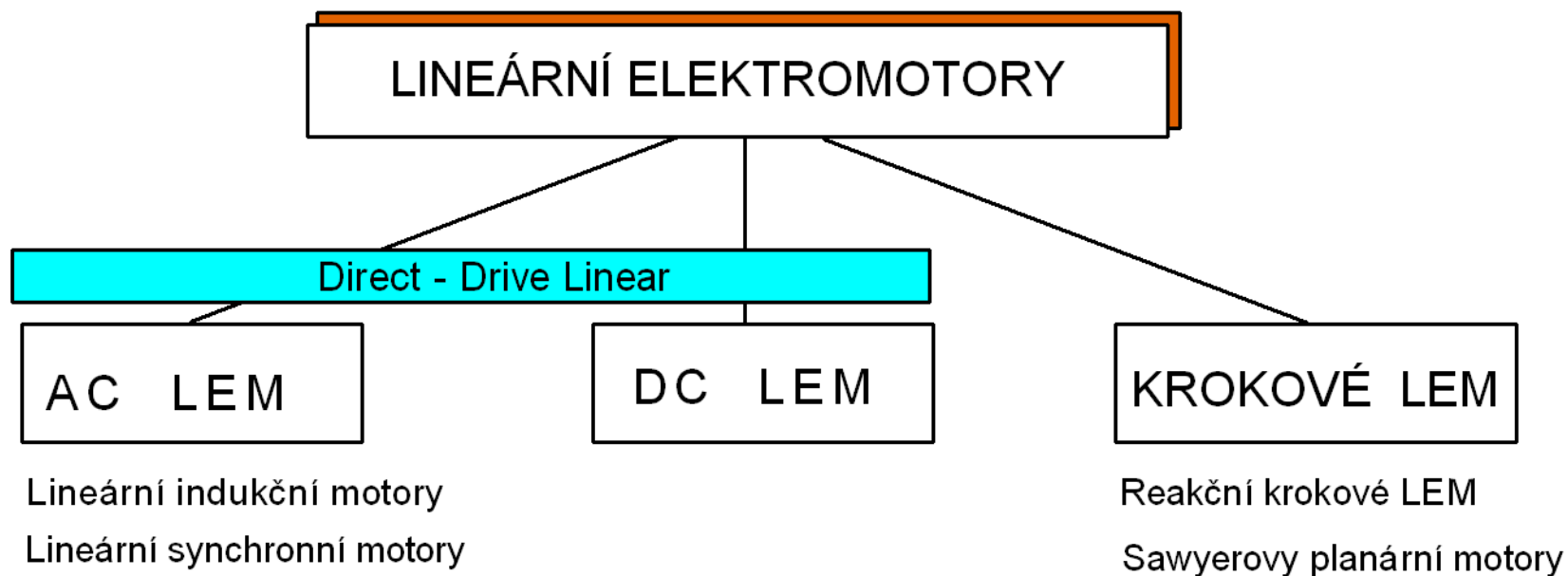
Jsou dosahovány o 50% vyšší hodnoty momentů oproti pětifázovým KM stejné hmotnosti, snížena hlučnost a potlačeny rezonanční efekty.

## *Lineární elektromotory v pohonech PR*

Rozšiřování aplikací elektropohonů je provázeno snahou prosadit přesné **elektropohony s translačním pohybem** výstupního členu **bez nutnosti transformace** typu pohybu dosud nekonvenčním typem motorů jsou lineární elektromotory (LEM).

[https://www.youtube.com/watch?v=0\\_QBl6-jJU](https://www.youtube.com/watch?v=0_QBl6-jJU)

## Lineární elektromotory v pohonech PR



### Typy lineárních elektromotorů (LEM)



## Lineární elektromotory v pohonech PR

Je veden intenzivní výzkum zaměřený na rozvoj všech základních typů LEM se snahou:

- **minimalizovat počet mechanických dílů** v řetězci pohonu (translační pohybové jednotky bez transformačních bloků);
- dosáhnout **vysokých rychlostí** přímočarých pohybů (jsou běžně dosažitelné rychlosti 3 až 6 m.s<sup>-1</sup> a špičkově 8 až 10 m.s<sup>-1</sup>);
- dosáhnout **uspokojivé přesnosti polohování** (při rychlostech 0,5 - 0,7 m.s<sup>-1</sup> lze provádět polohovou regulaci s přesností lepší než 0,5 mm);
- dosáhnout **vysokých přesností při mikropolohování** (aplikací lineárních krokových motorů a Sawyerových planárních motorů).

## *Lineární elektromotory v pohonech PR*

Motory označované Direct – Drive Linear (DDL) AC LEM se dělí na:

- bezkartáčové synchronní motory a
- lineární indukční motory (LIM).

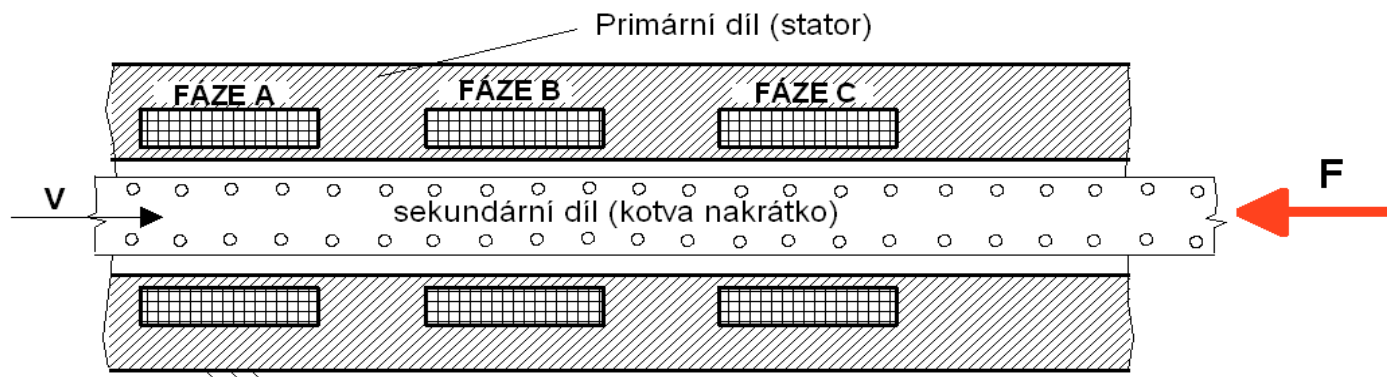
Postupně se v současné době prosazují více bezkartáčové synchronní motory, protože dosahují až 3x větší hustoty síly (poměr síly oproti objemu vinutí), mají rychlejší reakci a méně tepla je přenášeno do konstrukce motoru.

## Lineární indukční elektromotory

Lineární indukční (asynchronní) elektromotory (LIM) jsou pohony založené na principu elektromagnetické indukce.

Primární díl je tvořen třífázovým vinutím, kdy jednotlivé fáze jsou axiálně posunuty podél směru pohybu oproti sekundárnímu dílu, který je tvořen kotvou nakrátko.

Pohybový člen (translátor) se pohybuje se skluzem v žádaném směru podle pořadí zapojování fází a vytváří hnací sílu.



## Lineární indukční elektromotory

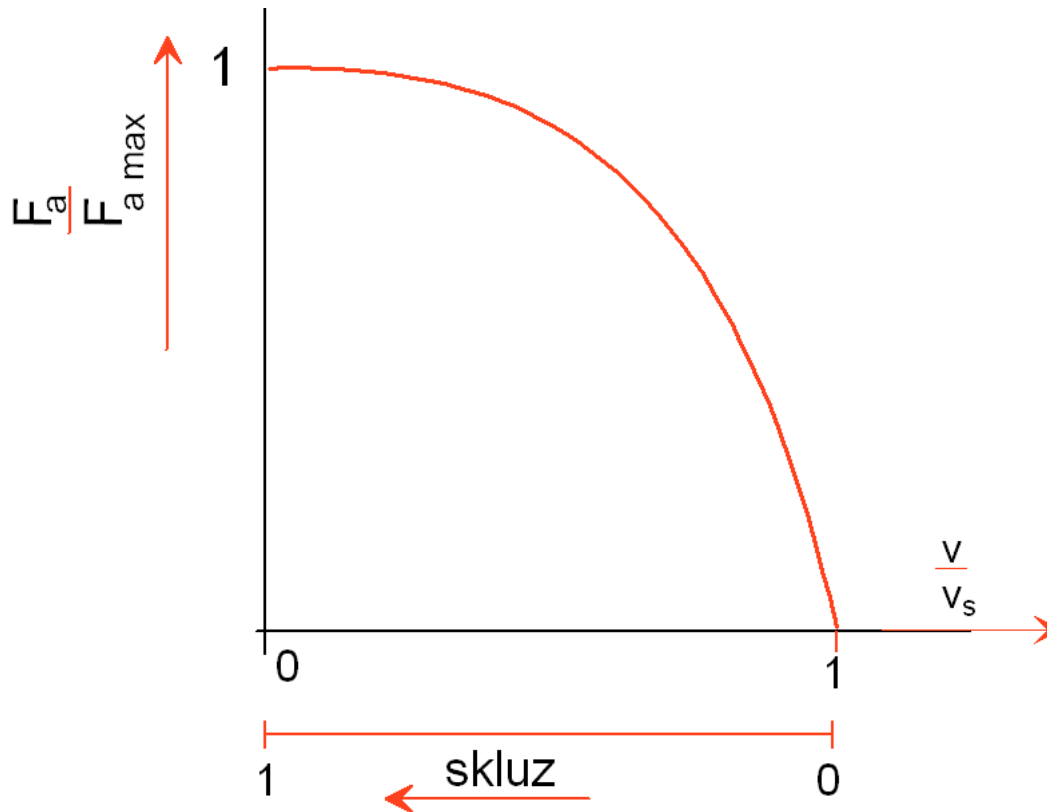
Posuvná síla  $F_a$  se mění v závislosti na velikosti napájecího napětí:

$$\left(\frac{F_a}{F_n}\right) \approx \left(\frac{U}{U_n}\right)^2$$

kde  $F_n$  - síla odpovídající jmenovitému napětí  $U_n$ ,  
 $F_a$  - hnací síla,  
 $U$  - napětí odpovídající hnací síle  $F_a$ ,  
 $U_n$  - jmenovité napětí.

## Lineární indukční elektromotory

Silová charakteristika lineárního motoru ukazuje monotónní závislost velikosti hnací síly na skluzu.



LEGENDA:

$$\text{Skluz } s = \frac{v_s - v}{v_s}$$

$v$  - posuvná rychlost

$v_s$  - synchronní rychlost

$F_a$  - síla ve směru posunu

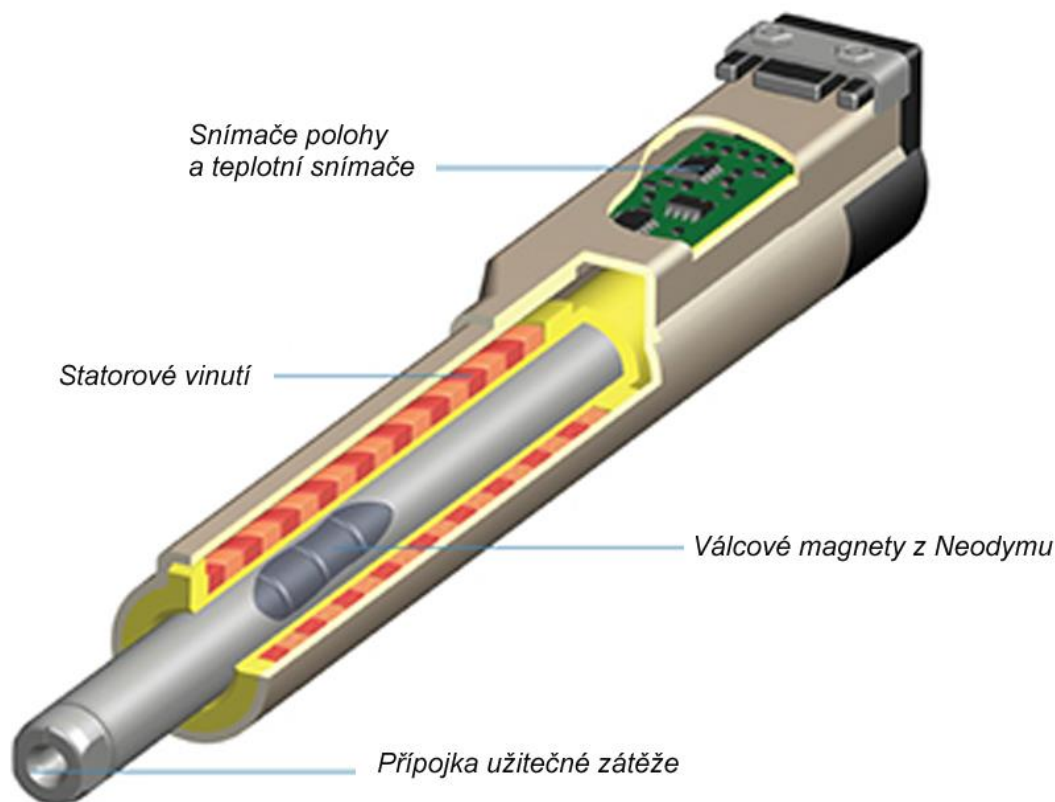
$F_{a \max}$  - maximální síla

## *Bezkartáčové synchronní LEM*

Bezkartáčové synchronní LEM jsou vyráběny:

- uzavřené skříňové provedení,
- otevřeném hřebenovém provedení pro těžší aplikace.

## Bezkartáčové synchronní LEM – uzavřené skříňové provedení



*Bezkartáčový synchronní motor ve skříňovém provedení – funkční schéma  
bezkartáčového synchronního motoru*

## *Bezkartáčové synchronní LEM – uzavřené skříňové provedení*



*Bezkartáčový synchronní motor ve skříňovém provedení – příklad provedení*



## *Bezkartáčové synchronní LEM – uzavřené skříňové provedení*

**Skříňové provedení** je kompaktní konstrukce s vysokým stupněm krytí (IP 67), vysokými hodnotami sil a přesností.

Pohybová tyč nese sekundární díl (soustavu neodymových magnetů), prochází uzavřenou skříní a je uložena buď do valivého, popř. kluzného vedení.

Stator (primární díl) má tvar trubky a nese třífázové vinutí.

Tyto motory jsou určeny pro zdvihy 70 - 220 mm, přičemž dosažitelné zrychlení je až 200  $m.s^{-2}$ .

Snímač polohy je montován zásadně na hnací stranu tyče, aby se zabránilo chybám odměřování v souvislosti s teplotní dilatací.

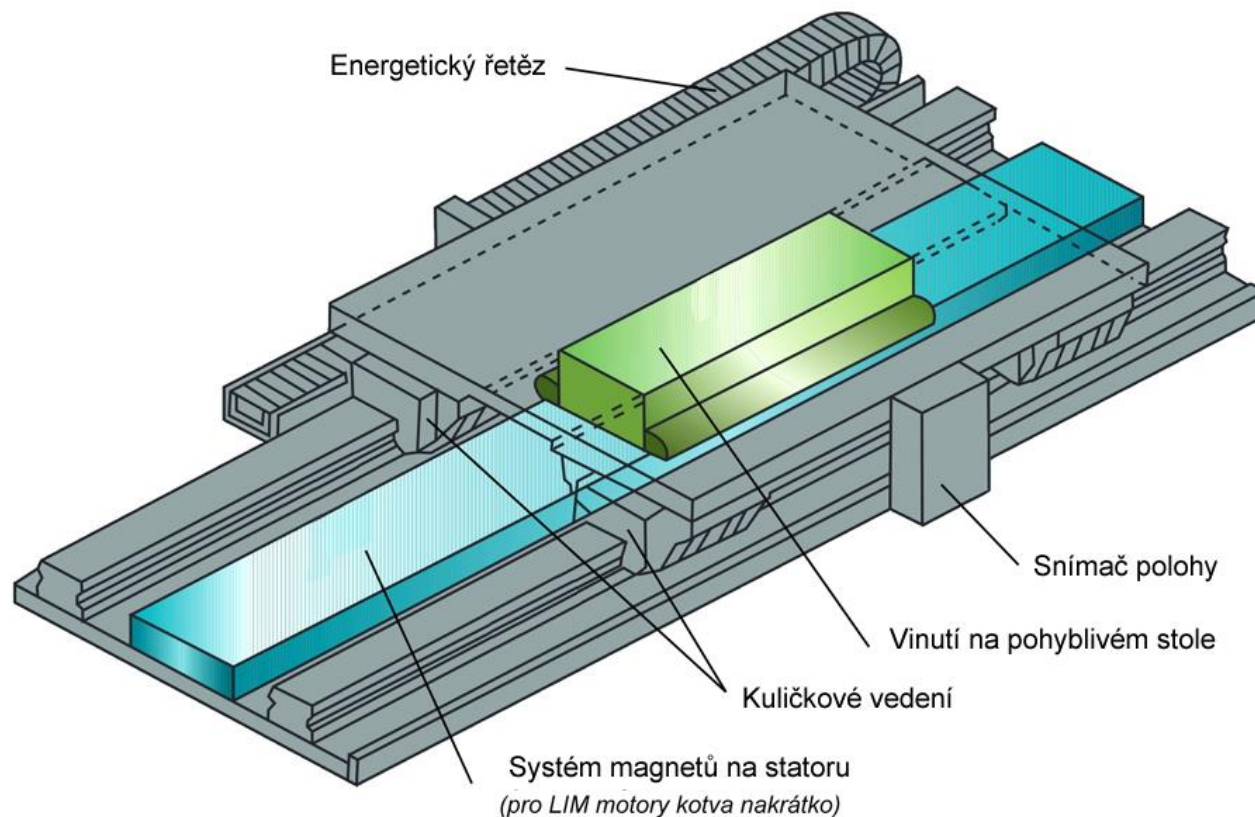
## *Bezkartáčové synchronní LEM – uzavřené skříňové provedení*

Jednotlivé verze jsou přitom vybaveny buď konvekčním anebo nuceným kapalinovým chlazením.

Rozsah užití je široký pro NC řízené vratné pohyby se **značnými zátěžnými silami** a vysokými nároky na **pohybovou dynamiku**.

Jsou k dispozici motory s klidovými silami v rozmezí od 170 do 2 900 *N* s hmotnostmi od 3,6 do 98 *kg*.

## Bezkartáčové synchronní LEM – otevřené hřebenové provedení



## *Bezkartáčové synchronní LEM – otevřené hřebenové provedení*

**Otevřená hřebenová provedení** jsou vhodným pohonem pro vodorovná pojezdová ústrojí manipulátorů a PR.

Systém magnetů (resp. pro lineární indukční motory kotva nakrátko) je zde součástí statoru a primární díl (vinutí) je spojeno s pohyblivým stolem, který je uložen valivě v rozděleném vedení pomocí valivých pouzder na profilových tyčích.

Používá se buď přirozené ventilační chlazení anebo tekutinové chlazení s nuceným oběhem.

Jsou zde dosažitelné rychlosti do  $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  se zrychlením do  $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  pro zátěžné síly od 170 do 3 000 N.

## *Bezkartáčové synchronní LEM – otevřené hřebenové provedení*

Relativně **vysoká hmotnost pohybových jednotek** s pohonem podle uvedeného obrázku, je omezujícím faktorem pro aplikaci těchto pohonů uvnitř kinematických řetězců manipulátorů a PR.

Nejčastěji se motory DDL v tomto konstrukčním uspořádání úspěšně aplikují pro **realizaci 7 osy robotu jako pojezd**.

Postupně se v současné době prosazují **více bezkartáčové synchronní motory**, protože dosahují až 3x větší hustoty síly (poměr síly oproti objemu vinutí), mají rychlejší reakci a méně tepla je přenášeno do konstrukce motoru.

## *Krokové lineární elektromotory*

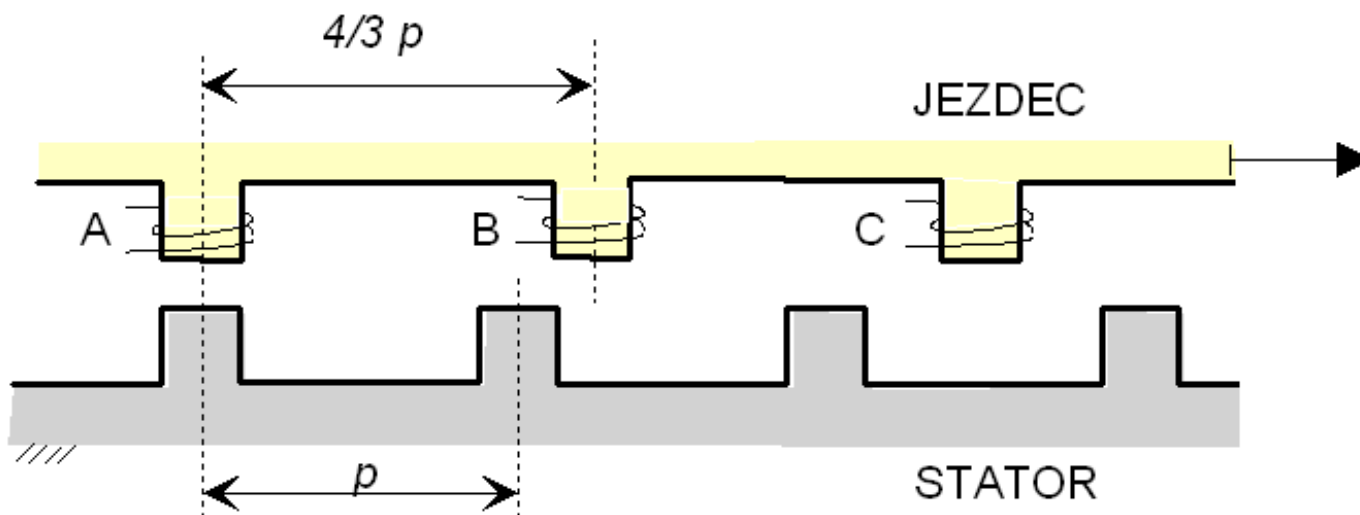
Krokové LEM vycházejí **svým principem z reakčních (reluktančních) krokových motorů** rozvinutých do roviny.

Základem je **dvojice elektromagnetů s opačnou polaritou** a polohová změna nastává minimalizací magnetického odporu, kdy jsou elektromagnety v opozici.

## Krokové lineární elektromotory

Stator je ve tvaru "zubového" hřebene a na pólových nástavcích statoru je vícefázové vinutí.

Ve schématu je zde pro příklad uvedeno třífázové vinutí statoru (A, B, C). Na statoru jsou zubové rozteče  $p$  a na jezdcí rozteče  $4/3 p$ , resp. obecně rozteče  $p \cdot (1 + 1/n)$ , kde  $n$  je počet napájecích fází.



## Krokové lineární elektromotory

S růstem počtu fází roste pak **počet kroků** =  $p/n$  na rozteč jezdce.

Typické hodnoty špičkových vyráběných motorů jsou rozteče  $p = 0,5$  mm a při počtu napájecích fází  $n = 4$  je velikost kroku  $p/n = 0,125$  mm/impulz.

Problémem lineárních krokových motorů je poměrně **nízká pracovní frekvence** (do 1 kHz), a tím malé rychlosti pohybu (řádově  $0,1$  m.s<sup>-1</sup>).

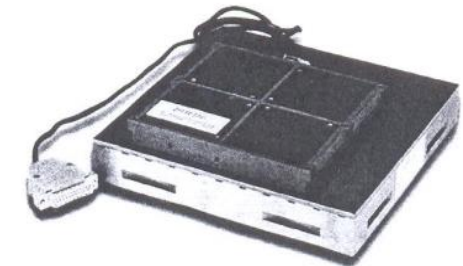
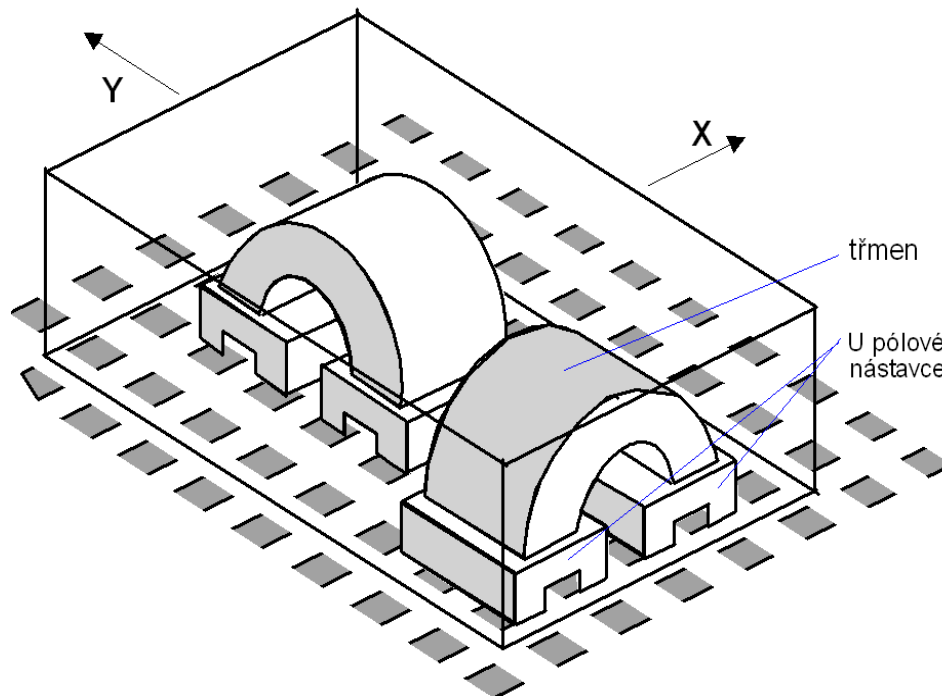
Tyto hodnoty lze dále výrazně zlepšovat a např. pro krok  $1$  μm/impulz je nutné zajistit  $n = 500$  diskretních fází.

Rychlý lineární KM s označením LINSTEP3 dodává firma Berger Lahr, jezdec dosahuje rychlosti až  $1,8$  m.s<sup>-1</sup>, avšak má přesnost jen  $\pm 2$  mm.



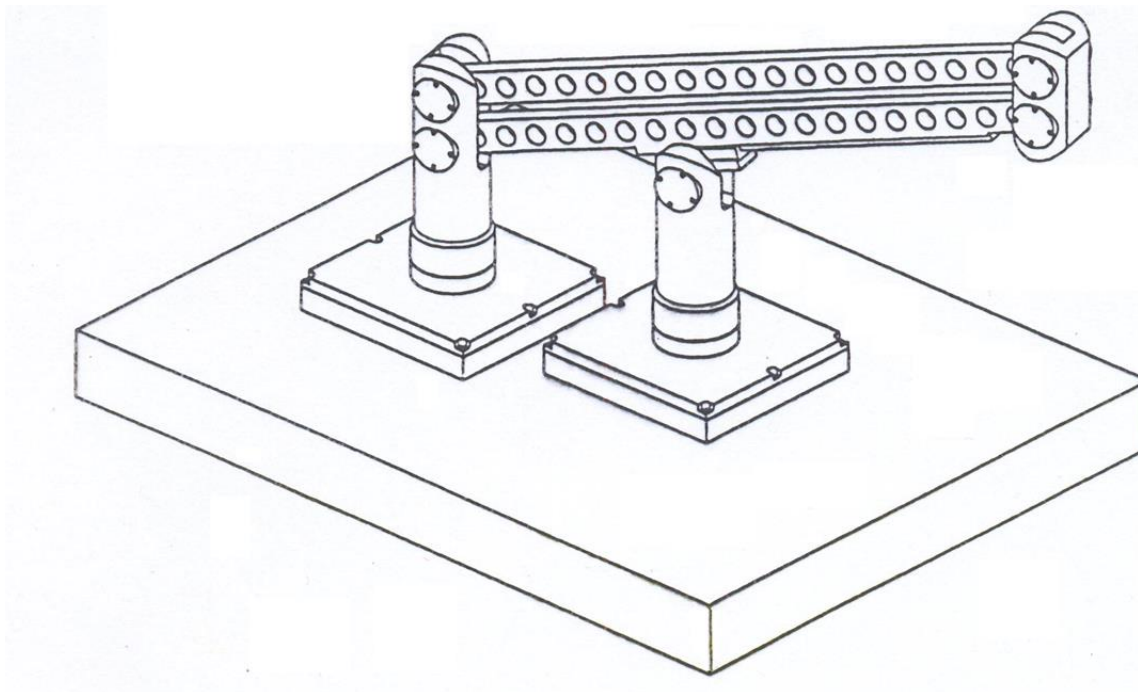
## Krokové lineární elektromotory

Tento princip rozvinul Bruce Sawyer (firma XYNETIC, Co. - USA) do planárních motorů s pohybem ve dvou na sebe kolmých osách.



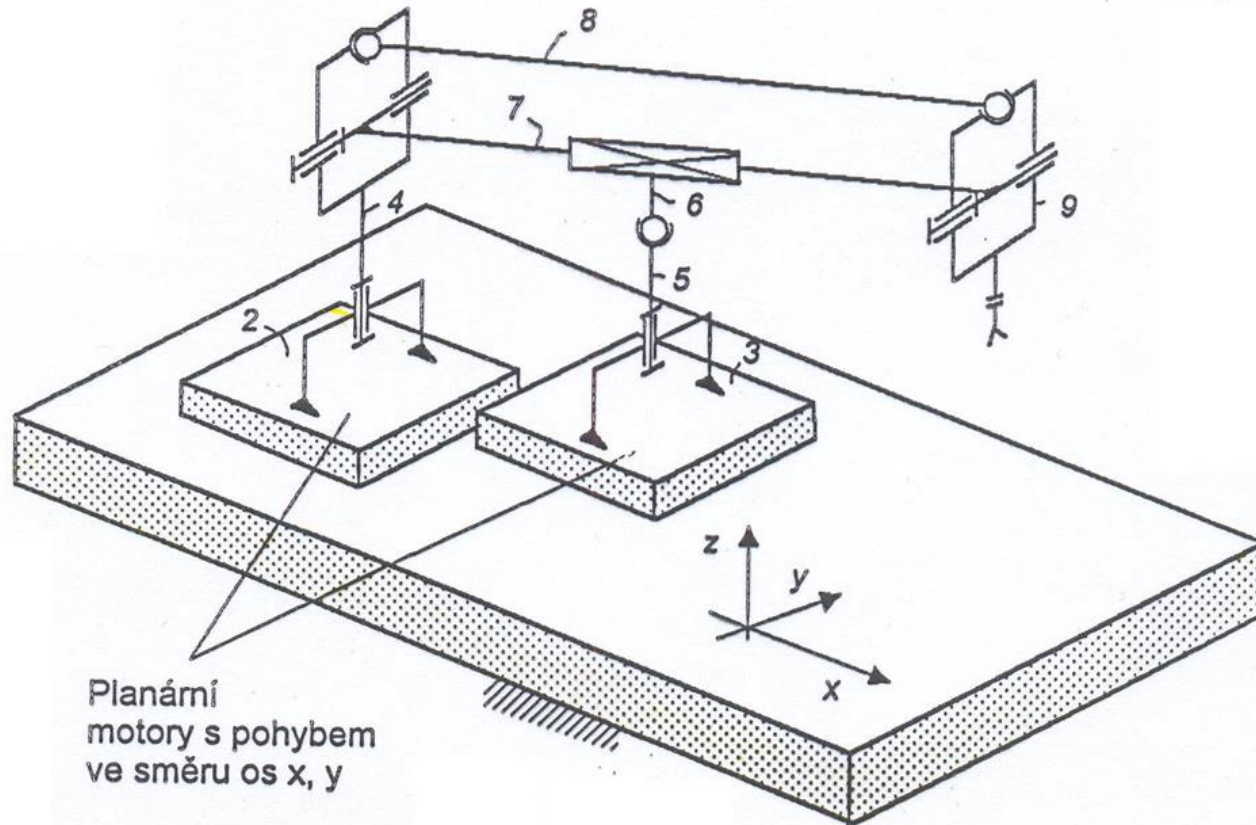
## Krokové lineární elektromotory

Tento pohon se jeví jako perspektivní pohon montážních mikrorobotů.



*Průmyslový robot s planárními motory – konstrukční provedení (firma 3D Automation)*

## Krokové lineární elektromotory



*Průmyslový robot s planárními motory – kinematické schéma robotu se 4° volnosti*

## *Krokové lineární elektromotory*

Motor aplikuje dvoufázové napájení obou pohybových os.

Vinutí na jednotlivých U pólových nástavcích je vždy souhlasné a vinutí dvojice nástavců na jednom třmenu je však opačného smyslu.

Tím je dosahováno příznivého efektu pro řízení pohybu.

Jezdec se pohybuje nad statorem na **vzduchovém polštáři** s výškou cca 1,5 mm při tlaku vzduchu 3,5 baru.

Přerušením proudu vzduchu dojde k zabrzdění motoru přitažením jezdce magnetickými silami.

# Příště: Efektory a periferní zařízení robotů