

ELEKTRICKÉ POHONY

1-01-041

Tomáš Šebeň

19.1.2022



ELEKTRICKÉ POHONY

Obsah kurzu

- Fyzikální jednotky, metrologie
- Fyzikální princip elektromotoru, magnetický obvod, 4Q režim
- Konstrukce motoru, magnetický obvod motoru
- Parametry elektromotoru, charakteristiky, rozběh, jištění
- Diagnostika elektromotoru – izolační odpory, stav vinutí, sběrací systém
- Třífázový indukční motor – funkce, zapojení, diagnostika
- Motor nakrátko – konstrukce, vinutí, zapojení, řízení (rozběh, otáčky)
- Synchronní třífázový motor
- Jednofázové AC motory s pomocnou fází, univerzální motor
- DC motory – konstrukce, zapojení, užití
- Krokový motor
- Praktické cvičení a měření – průběžně u jednotlivých kapitol
- Závěr kurzu – písemný test znalostí

Fyzikální jednotky – soustava jednotek SI

Základní jednotky SI

Název	Symbol	Značka	Význam, definice
metr	m	l	délka, vzdálenost
kilogram	kg	m	hmotnost
sekunda	s	t	čas
ampér	A	i	elektrický proud
termodynamická teplota	K	u	teplota (Kelvin), stupeň , $0\text{ K} = -273,16\text{ }^{\circ}\text{C}$
látkové množství	mol	mol	mol
svítivost	cd	cd	kandela

Fyzikální jednotky – soustava jednotek SI

Předpony jednotek

Faktor	Předpona	Značka	Faktor	Předpona	Značka
10^3	kilo	k	10^{-3}	mili	m
10^6	mega	M	10^{-6}	mikro	μ
10^9	giga	G	10^{-9}	nano	n
10^{12}	tera	T	10^{-12}	piko	p
10^{15}	peta	P	10^{-15}	femto	f
10^{18}	exa	E	10^{-18}	atto	a
10^{21}	zetta	Z	10^{-21}	zepto	z
10^{24}	yotta	Y	10^{-24}	yokto	y

Fyzikální jednotky – soustava jednotek SI

Odvozené jednotky

Název	Symbol	Značka	Význam, definice
teplota	°C	u,t	stupeň Celsia
rovinný úhel	rad	rad	radián (57,3 úhlového stupně, $1^{\circ} = 1/360$ kruhu)
frekvence	Hz	f	Hertz (kmity za sec)
síla	N	F	Newton (uvede těleso do pohybu)
práce, energie	J	A	Joule
výkon	W	P	Watt
elektrická práce.energie	Ws	A	Watsekunda = J
elektrické napětí	V	U	Volt
kapacita	F	C	Farad (kondenzátor)
indukčnost	H	L	Henry (cívka)
světelný tok	lm	lm	Lumen (candela na prostorový úhel)
osvětlení	lx	lx	Lux (tok na plochu)
elektrický odpor	Ω	R	Ohm (vlastnost materiálu vést el. proud)
magnetická indukce	T (G)		Tesla (1T = 10 000 G = Gaus)
kroučící (ohybový) moment	Nm	M	Newton metr

Fyzikální jednotky – soustava jednotek SI

Přijímané jednotky

Název	Symbol	Značka	Význam, definice
tuna	t	m	hmotnost (1000 kg)
dekagram	dkg	m	hmotnost (0,1 kg)
decilitr	dcl	V	objem
centimetr	cm	l	délka
minuta	min	t	čas
dioptrie	dioptrie		optická mohutnost
atmosfera	atm	p	tlak (kpcm ⁻²)
hektar	ha	S	plocha (10 000 m ²)

Metrologický řád ŠKODA AUTO a.s.

Metrologie se zabývá jednotností a správností měření.

Organizační norma č. ON.1.018

- Závazný pro všechny zaměstnance ŠKODA AUTO.
- Pokyny k měření a jejich postupy



Měření

Měření je objektivní nástroj pro ověření kvalitativních a množstevních parametrů

Kontrola měřidel:

Technický stav

Poškození, opotřebení, znečištění

Nezávadnost funkce

Překoušení správnosti



Nejistota měření (chyba):

Vždy přítomná

Rozdíl naměřené a skutečné hodnoty

Nejistoty se vždy minimalizují

Překoušení správnosti

Zdroje nejistoty měření:

Způsob připojení měřícího přístroje

Zvolená metoda měření

Odečet hodnot z přístroje

Rušení v prostředí přístroje

Chyba rozsahu přístroje

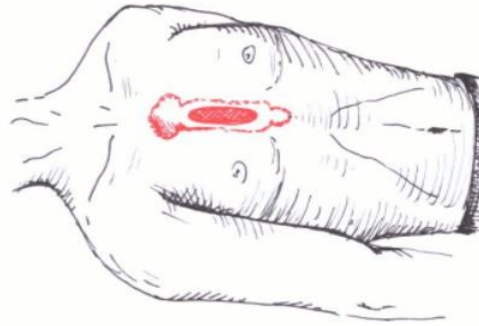
Chyba zobrazení přístroje

Chyba z naměřené hodnoty

První pomoc

První pomoc (rychle – klidně - rozvážně)

- Zavolej pomoc (nebýt na to sám)
- Eliminuj rizika (vypni, has, větrej)
- Kontrola vědomí, dýchání a zranění
- Záklon hlavy pro uvolnění dýchacích cest
- Nepřímá masáž srdce (100 - 120/min, 4-5 cm hluboko)
- **Neohroz sám sebe na životě !**



Ochrana před úrazem elektrickým proudem

Živá část – za běžných okolností pod napětím

- Izolace – odstranění pouze zničením, pro trvalé provozní napětí
- Krytí IP 2X
- Zábrana – brání nahodilému (neúmyslnému) dotyku
- Poloha – umístění mimo dosah při normálním užívání
- Doplnková ochrana
- Proudový chránič (0,2s, 30mA)
- Doplnková izolace (izol. koberec, izol. rukavice)

Neživá část - za běžných okolností bez napětí

- Pospojování
- Použití zařízení třídy II (izol. odpor běžně $7M\Omega$, mechanická odolnost)
- Samočinné odpojení od zdroje (jistící prvky)
- Elektrickým oddělením (transformátor)

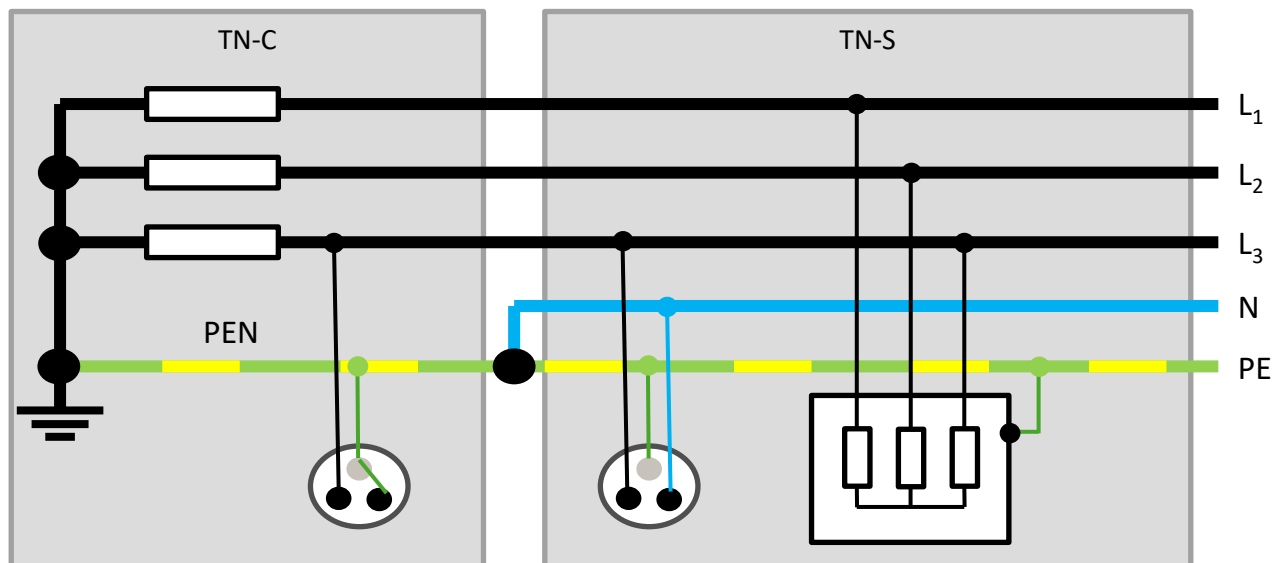
Ochrana malým napětím

- SELV
- PELV



Třífázová rozvodná soustava

Druhy sítí a parametry



L – fáze (Line) – černá, hnědá, šedá

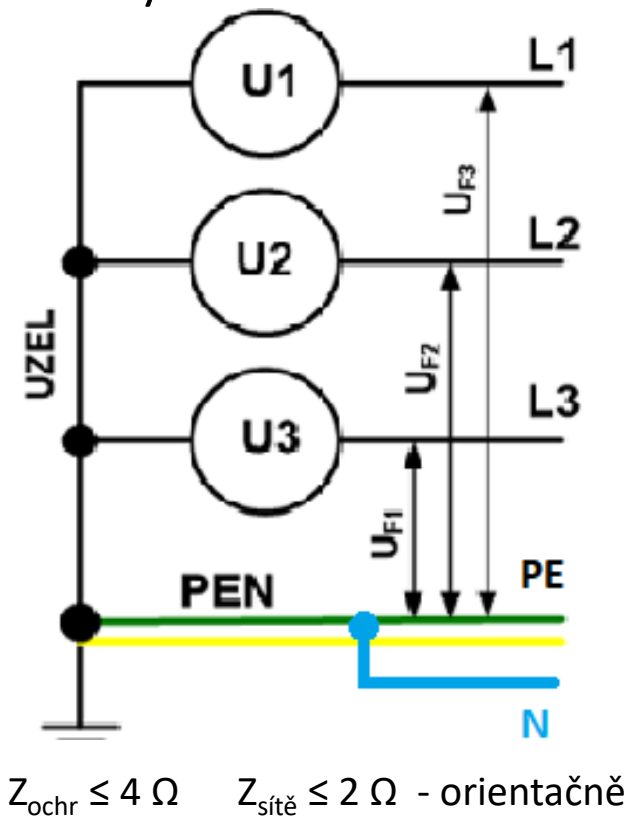
N – pracovní vodič (Neutral) – světle modrá

PE – ochranný vodič (Protected Earth) – žlutá a zelená

PEN – ochranný a pracovní vodič (Protected Earth and Neutral)
– žlutá a zelená

Třífázová rozvodná soustava

Parametry



$$U_S = \sqrt{3} U_F$$

U_f – fázové napětí

L-N (L-PE, L-PEN)

U_f = 230 V

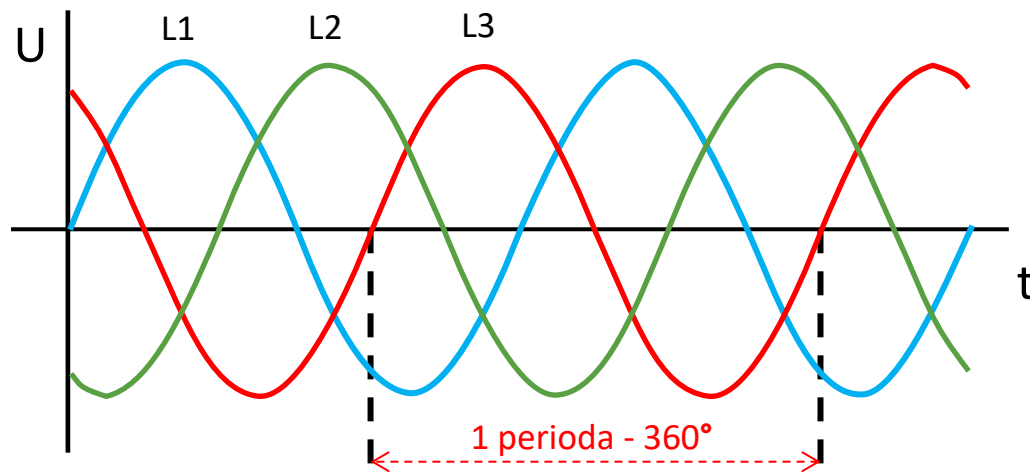
U_{fmax} = $\sqrt{2} * 230 = 325\text{V}$

U_s – sdružené napětí

L₁-L₂ (L₁-L₃ nebo L₂-L₃)

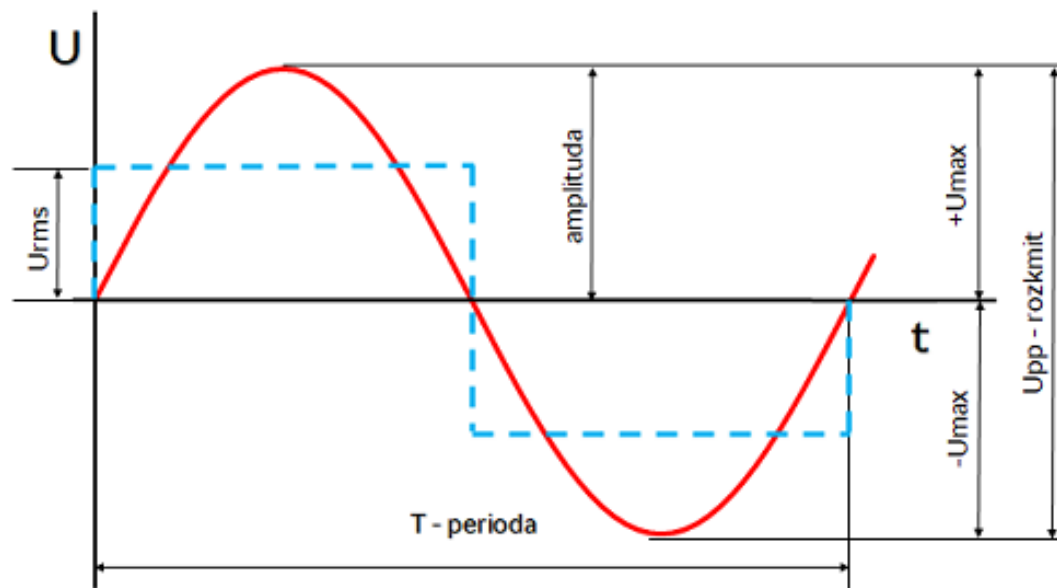
U_s = 400 V

U_{smax} = $\sqrt{2} * 400 = 565\text{V}$



Třífázová rozvodná soustava

Pro sinusový průběh platí:



$$U_{RMS} = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}$$

$$U_{\max} = \sqrt{2} U_{RMS}$$

$$U_{pp} = U_{\max} + |-U_{\max}|$$

Sinusový průběh AC proudu (napětí) - RMS (efektivní hodnota)

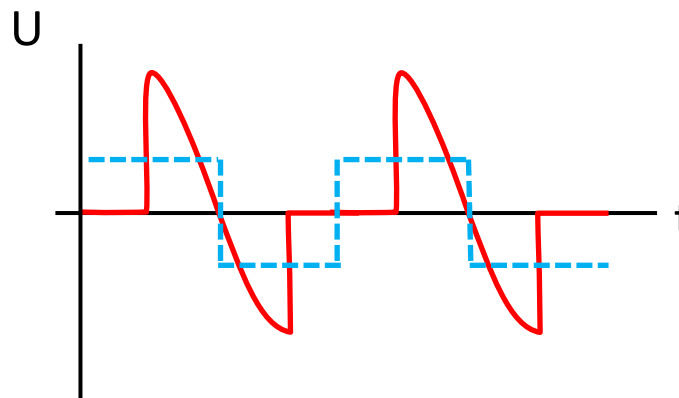
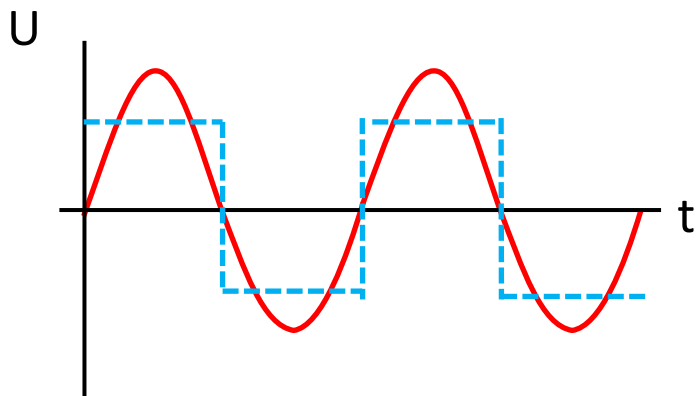
$$f = \frac{1}{T} \quad (\text{Hz}) \quad T = \frac{1}{f} \quad (\text{s})$$

T perioda = čas trvání kmitu (s)

f frekvence (kmitočty) = počet kmitů za 1s

Třífázová rozvodná soustava

Pro sinusový průběh platí:



- **RMS (efektivní hodnota)** – stejné tepelné účinky (výkon) jako stejná DC hodnota
- **TRMS (skutečná efektivní hodnota)** – měřeno vzorkováním u nesinusových průběhů
- **Střední hodnota** – stejné chemické účinky jako stejná hodnota DC

Fyzikální princip elektromotoru

Elektromagnetické pole

Statické

- Vytvořeno průchodem DC proudu indukčností (vodičem).
- Pole má trvale určenou polaritu – póly (S a J)
- Statické magnetické pole vytváří i **permanentní** (trvalý) magnet.

Dynamické

- Vytvořeno průchodem AC proudu indukčností.
- Pole má proměnnou polaritu i silové účinky odpovídající časové změně budícího proudu.

Magnetizační proud

- Elektrický proud vodiči (obvodem)

Magnetické materiály

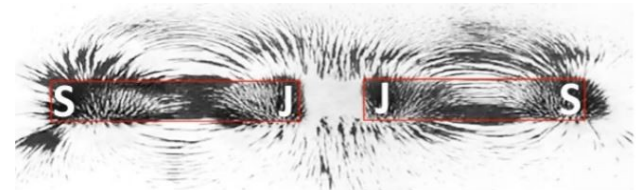
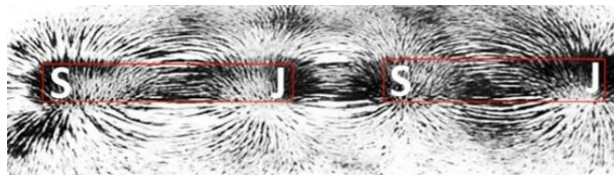
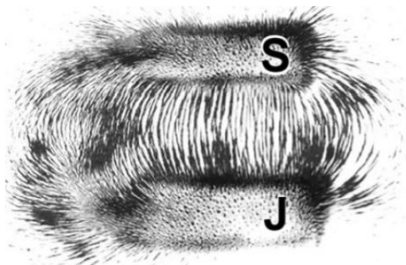
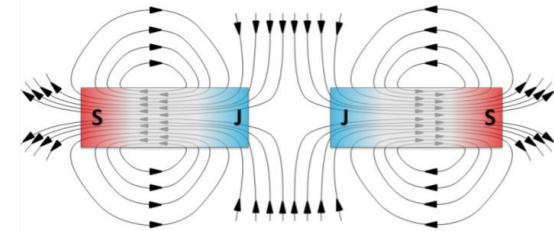
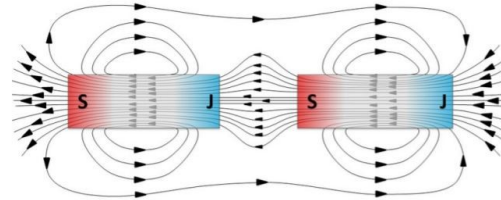
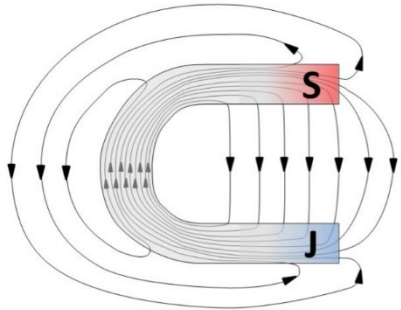
- Působí na ně magnetické pole ve formě přitažlivé nebo odpudivé síly.
- Pozitivně ovlivňují parametry magnetického pole – zesilují, koncentrují do daného prostoru.

Fyzikální princip elektromotoru

Magnetické pole a jeho veličiny

Magnetická pole

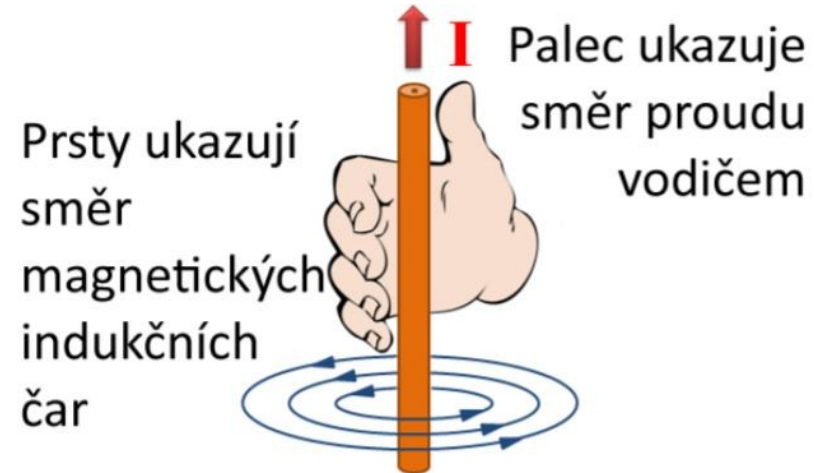
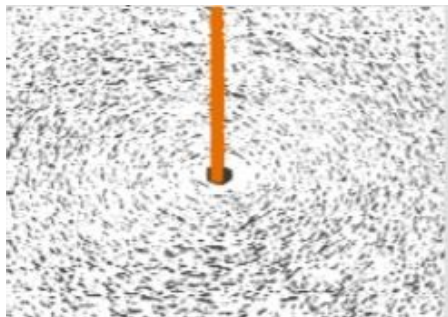
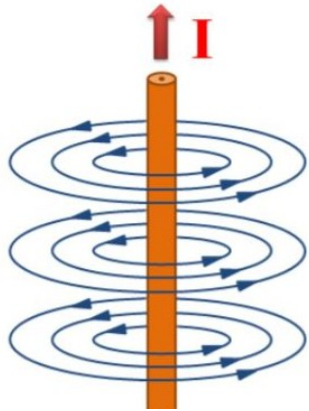
- Dvě (i více) magnetická pole na sebe působí silou přitažlivou nebo odpudivou.
- Silové působení magnetických polí - Souhlasné póly se odpuzují, nesouhlasné póly se přitahují.
- Je-li jedno pole pohyblivé nebo buzeno AC proudem jsou silové účinky dynamické.



Fyzikální princip elektromotoru

Magnetické pole a jeho veličiny

- Magnetického pole vodiče



Pravidlo pravé ruky

Vodič uchopíme pravou rukou.

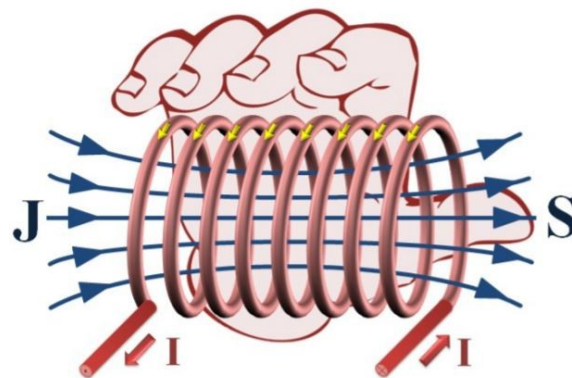
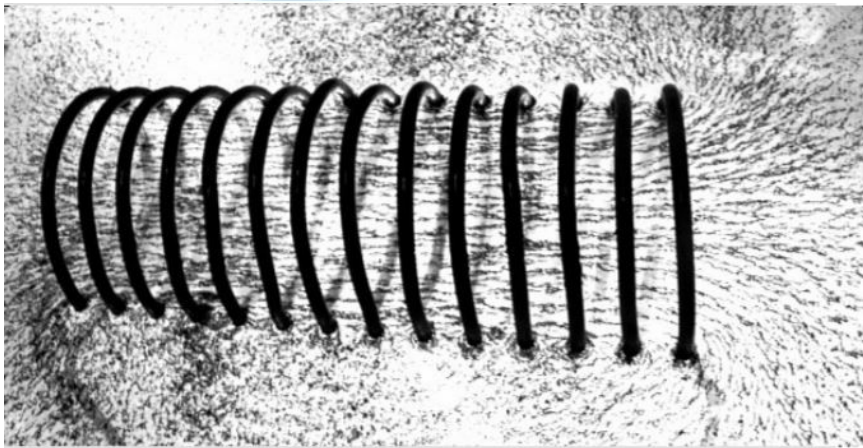
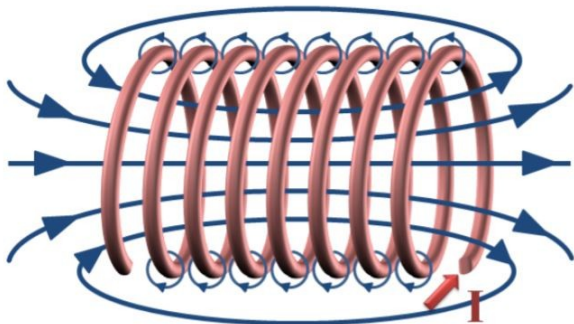
Palec ukazuje směr proudu ve vodiči (od plus k minus).

Ohnuté prsty obepínající vodič ukazují směr magnetických siločar.

Fyzikální princip elektromotoru

Magnetické pole a jeho veličiny

Magnetického pole cívky



Cívku uchopíme pravou rukou.

Ohnuté prsty obepínající cívku ukazují směr proudu v cívce, palec ukazuje směr magnetických siločar.

Fyzikální princip elektromotoru

Magnetické pole a jeho veličiny

Intenzita magnetického pole

- Je dána velikostí magnetického napětí na jednotku délky siločáry. $H = \frac{Um}{l}$ (A/m)
- Čím je siločára delší, tím menší bude intenzita a také menší silové působení.

Magnetická indukce

- Magnetická indukce vyjadřuje míru magnetické energie tělesa nebo magnetickou energii mezi póly magnetu.
- Teoreticky se každá látka zmagnetuje v závislosti na vlastních magnetických vlastnostech a energii.
- $B = \mu H$ (T) nebo (G) 1T = 10000 G

Poměrná permeabilita

- Materiálová konstanta vyjadřuje magnetické vlastnosti látek ve vztahu k vakuu. $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$
- Permeabilita je analogií měrného odporu v elektrickém obvodu.

Fyzikální princip elektromotoru

Magnetické pole a jeho veličiny

Magnetický tok Φ (Weber)

- Magnetické pole můžeme chápat jako obdobu elektrického pole.
- Magnetické napětí tvořené průchodem proudu vodičem vybudí v okolním prostředí magnetický tok ve formě siločar.
- Celkové množství siločar procházejících danou plochou kolmou na siločáry (neboli magnetický tok touto plochou) můžeme určit z hustoty siločar, neboli z magnetické indukce. $\Phi = \mathbf{B} / \mathbf{S}$ (T/m²).

Reluktance - magnetický odpor

- Je soubor vlastností materiálů, ze kterých se skládá magnetický obvod a kterými prochází **magnetický tok Φ** (vyvolaný mag. Indukcí a intenzitou mag. Pole.
- $R_m = \frac{l}{\mu S}$, Magnetický odpor dán rozměry materiálu (průřez S, délka l) a jeho magnetických vlastností (μ_0).
- *R_m je analogií elektrického odporu v elektrickém obvodu.*
- Reluktance je **zdrojem ztrát** magnetické energie.

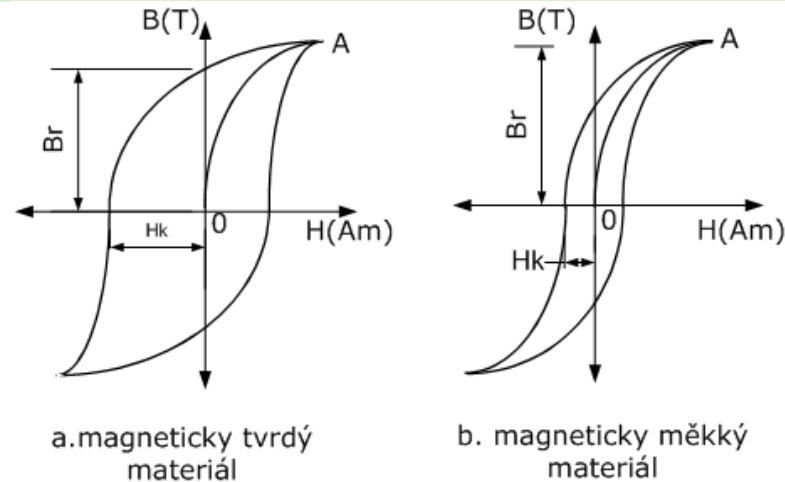
- **Hopkinsonův zákon**
- Obdoba Ohmova zákona $\Phi = F_m / R_m$.
- Hopkinsonův zákon popisuje vzájemný vztah magnetických veličin.

Fyzikální princip elektromotoru

Magnetické pole a jeho veličiny

Materiály v magnetickém poli

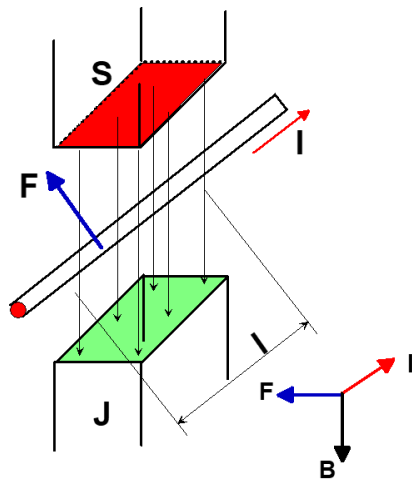
- schopnosti zmagnetování se
- **Feromagnetické** ($\mu_r \gg 1$) - dobře se magnetizují (železo, nikl, kobalt a jejich slitiny,...)
- **Paramagnetické** ($\mu_r > 1$) – po zmagnetování ztrácí časem magnetismus (hliník, platina,...)
- **Diamagnetické** ($\mu_r < 1$) - nemagnetické materiály (měď, zinek, zlato, sklo, voda, vzduch,...)



Fyzikální princip elektromotoru

Flemingovo pravidlo levé ruky (motorové pravidlo)

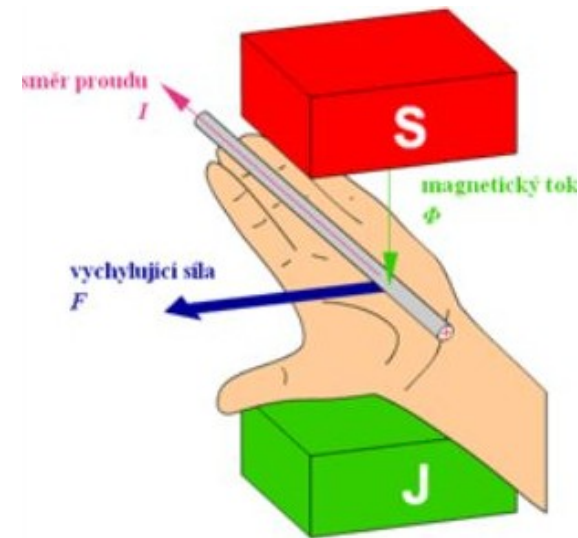
- Nastavíme-li levou ruku tak, aby indukční čáry magnetického pole vstupovaly od severního pólu kolmo do dlaně a natažené prsty ukazovaly směr proudu ve vodiči, pak vztyčený palec ukazuje směr síly F vychylující vodič
- Síla působící na vodič je rovna součinu mag. indukce, protékajícímu proudu a délce vodiče, na který působí mag. indukce



B - dlaň, F - palec, I - prsty

a. silové účinky na vodič
směr síly - pravidlo levé ruky

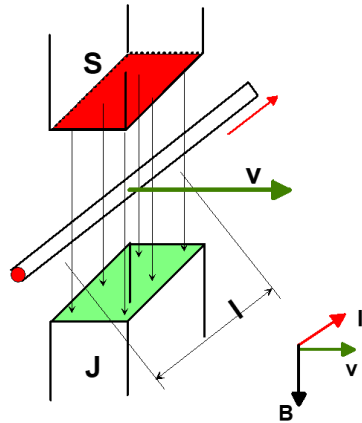
$$F = BIl$$



Fyzikální princip elektromotoru

Pravidlo pravé ruky (generátorové pravidlo)

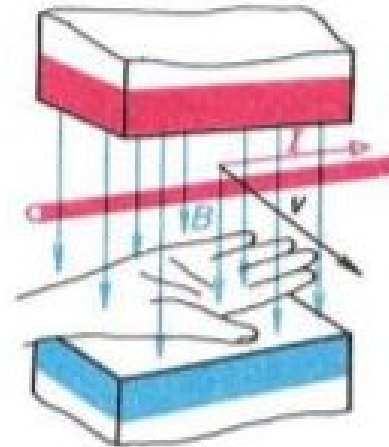
- Velikost induk. napětí je rovno součinu mag. indukce, délce vodiče v mag. poli, a rychlosti pohybu vodiče v mag. poli
- Položíme-li pravou ruku dlaní k vodiči tak, aby indukční čáry vstupovaly do dlaně a odvrácený palec ukazoval směr pohybu vodiče, pak směr proudu ve vodiči je od hřbetu ruky k napjatým prstům. (Princip činnosti dynam - indukované napětí).
- Opět se potvrzuje tvrzení, že indukované napětí působí proti změně, která ji vyvolala.



B - dlaň, v - palec, I - prsty

b. indukční zákon
směr proudu - pravidlo pravé ruky

$$U_i = Blv$$



Jištění elektromotoru

Dimenzování přívodních vodičů a jisticích prvků patří k základním činnostem při instalaci motoru. Tyto dva spolu těsně související kroky vychází z:

- **příkon motoru** - je výrazně větší než štitkový parametr výkonu motoru (mechanický) výkon
- **stupně rozběhu**
- **soudobosti chodu**

Tavná pojistka

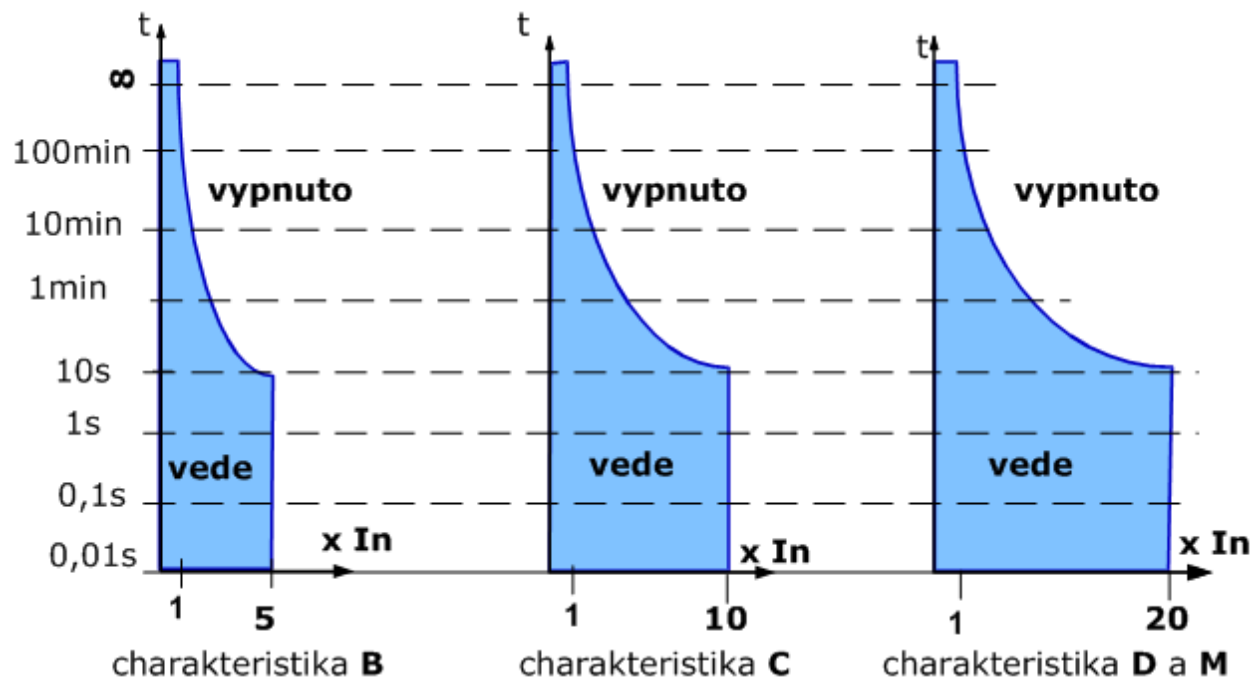
- ochrana před zkratem
- Přetížení vyhodnocuje nedostatečně

Jistič (elektromagnetický):

- tepelná část (bimetal) – ochrana proti přetížení (nadproud)
- elektromagnet – zkratová ochrana



Jištění elektromotoru



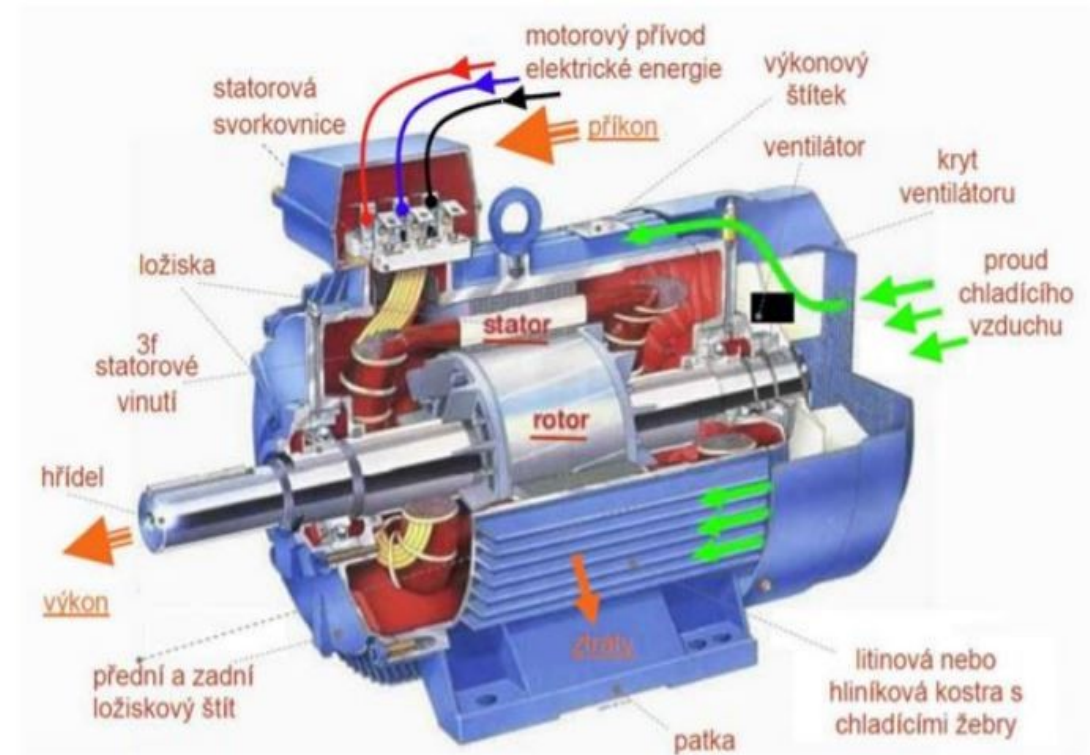
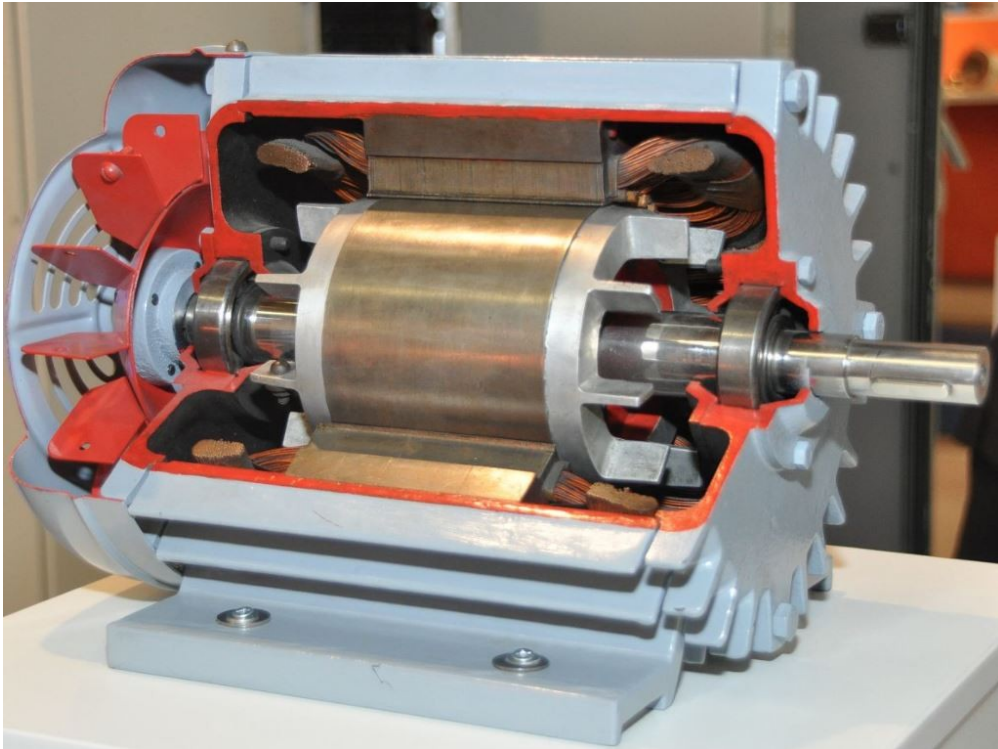
Vybavení zkratové spoště:

- B - $3 \div 5 I_n$
- C - $5 \div 10 I_n$
- D - $10 \div 20 I_n$

- při $1,13 I_n$ nesmí vypnout do 1 hodiny
- při $1,45 I_n$ musí vypnout do 1 hodiny

Střídavé (AC) motory

Indukční třífázový motor s kotvou na krátko



Indukční třífázový motor s kotvou na krátko

Konstrukce

Stator

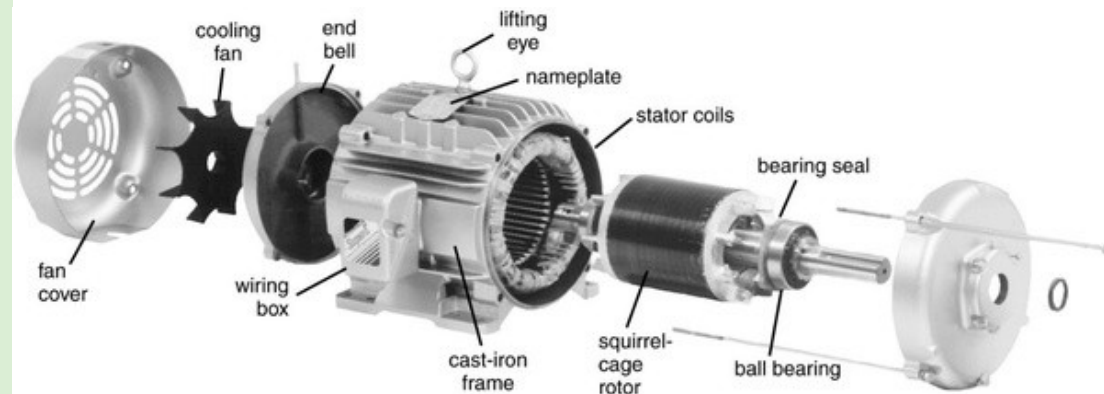
- 3 elektricky vzájemně oddělené cívky s vývody na svorkovnici
- Svorkovnice pro zapojení motoru a jeho připojení ke zdroji energie
- Statorové plechy – zesilující dynamické magnetické pole cívek
- Ložiska – pro uložení rotoru
- Kryt ventilátoru – nutný pro vlastní chlazení motoru
- Bimetalový rozpínací prvek – signalizace přehřátí
- Štítek s parametry motoru

Možné doplňky

- Elektromagnetická brzda
- PT100 – termistor pro odečítání aktuální teploty motoru
- Inkrementální i absolutní snímač, resolver – snímání rychlosti a polohy rotoru
- Převodovka

Rotor

- Rotorová klec – vinutí na krátko (do zkratu)
- Rotorové plechy vzájemně izolované – zesilující magnetické pole rotoru
- Ventilátor – vlastní chlazení motoru

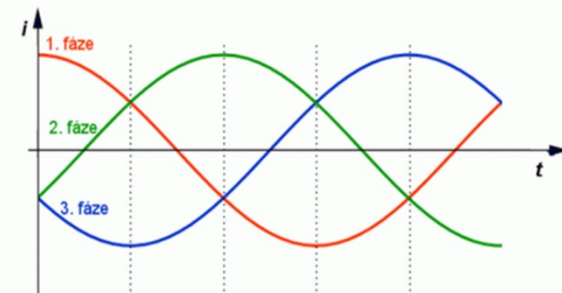
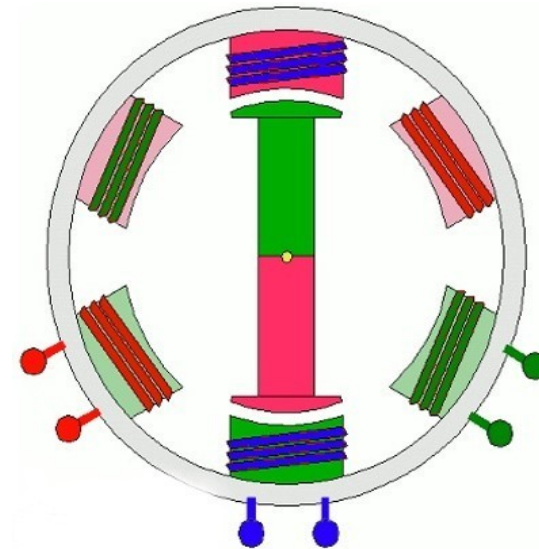


Indukční třífázový motor s kotvou na krátko

Funkce

Stator

- Statorové vinutí – primární vinutí
- Proud cívkou tvoří magnetické pole
- Magnetické pole se otáčí a sílí dle směru a velikosti proudu
- Dvoupólovému motoru stačí k otočení magnetického pole o 360° jedna celá sinusovka
- Magnetický obvod - dynamoplechy



Indukční třífázový motor s kotvou na krátko

Funkce

Rotor

- Rotorové vinutí – sekundární vinutí
- V každé jedné části vinutí rotoru se indukuje napětí díky nejbližšímu poli ve statoru
- Díky konstrukci na krátko začne rotorem téct proud a tvořit se magnetické pole
- To se děje se zpožděním a celkově tedy se skluzem
- Magnetický obvod – dynamoplechy



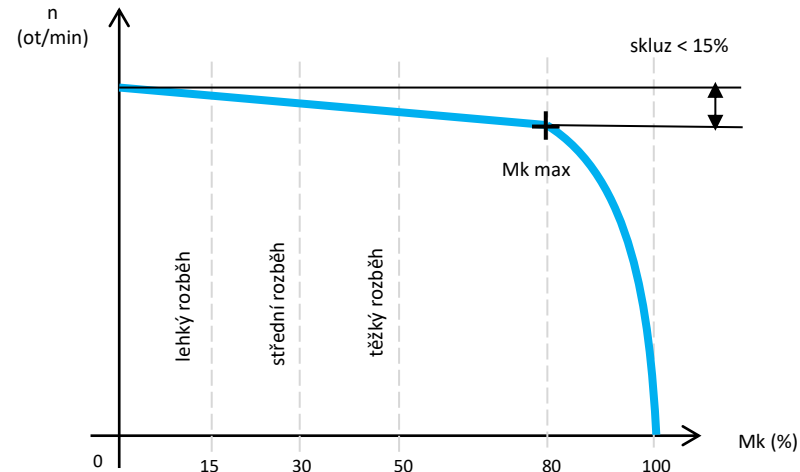
Indukční třífázový motor s kotvou na krátko

Asynchronní otáčky a kroutící moment

VELIKOST proudu statorem



$$M_k = 9,55 \times \frac{P}{n} \quad (Nm, W, ot/min)$$



100% M_k – největší moment motoru – nulové otáčky stav nakrátko

Indukční třífázový motor s kotvou na krátko

Asynchronní otáčky

FREKVENCE proudu statorem

- U 2-pólového motoru - 1 pólou dvojičí (3 statorové cívky) stačí jedna sinusovka pro celé otočení rotoru
- Záleží tedy především na rychlosti (frekvenci) sinusového průběhu
- U více pólových motorů se rychlost dělí počtem pólových dvojič, čím více pólů, tím otáčky klesají

při $f = 50\text{Hz}$
2 pólové dvojice

$$n_{\text{synch}} = \frac{60 \times 50}{2} = \frac{3000}{2} = 1500 \text{ ot/min}$$

$$n_{\text{synch}} = \frac{60 \times f}{p} \left(\frac{\text{ot}}{\text{min}}, \text{Hz, pól. dvojice} \right)$$

Skluz motoru

Rozdíl mezi točivým magnetickým polem statoru (teoretické synchronní otáčky)

a

Skutečnými otáčkami rotoru

Skluz se zvětšuje se zátěží motoru – potřebný čas k vytvoření silnějšího magnetického pole v rotoru

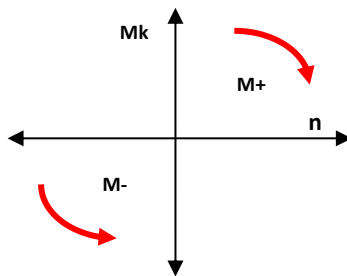
počet pólů	2p	2	4	6	8	10	12	14	16
Počet pol. dvojic	p	1	2	3	4	5	6	7	8
synchro nní otáčky	$n_s [\text{min}^{-1}]$	3000	1500	1000	750	600	500	428.6	375

Indukční třífázový motor s kotvou na krátko

Elektrický točivý stroj - 4 kvadrantový provoz

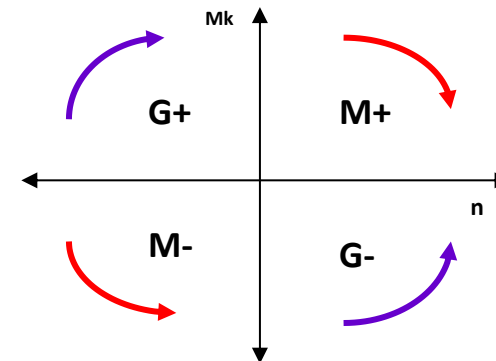
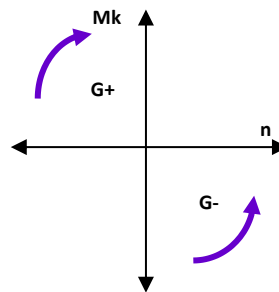
Funkce motoru

- Elektrická energie → pohybová energie
- Motor se může otáčet na jednu či druhou stranu
- Reverzace se provede prohozením **libovolných dvou** fází na vstupu motoru



Funkce generátoru

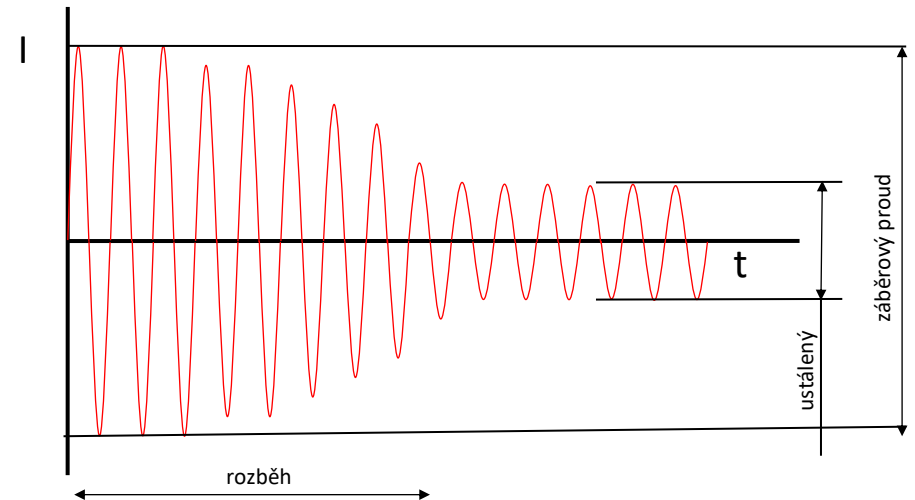
- Pohybová energie → elektrická energie
- Generování energie lze provádět v obou směrech otáčení stroje
- Pohyb ze zajišťován vnější silou
- Asynchronní** stroj generuje energii pouze při stálém připojení ke zdroji elektrické energie, kdy se využívá zbytkový magnetismus a čas demagnetizace vinutí rotoru
- Synchronní** stroje využívají k tvorbě magnetických pólů v rotoru permanentních magnetů a/nebo elektromagnetu (vinutí s vyvedením na svorky)



Indukční třífázový motor s kotvou na krátko

Rozběh motoru

- Pro rozpořhování rotoru je zapotřebí více energie než pro jeho udržení v pohybu
 - Zachování hybnosti
 - Větší mechanický odpor
 - Větší záběrný (počáteční) proud – i několikanásobně větší než ustálený proud
 - Dle výkonu motoru a charakteru zátěže může rozběh trvat **0,1s až minuty**
- Jištění
 - Musí být dimenzováno na tyto proudy a časy
 - Jističe typu C nebo D s delší vypínací charakteristikou
- Omezení záběrných proudů
 - Rozběh na prázdkno – bez zátěže
 - Přepnutím zapojení Y- Δ
 - Použitím softstartéru
 - Použitím frekvenčního měniče



Indukční třífázový motor s kotvou na krátko

Zapojení motoru – Y

Y - hvězda

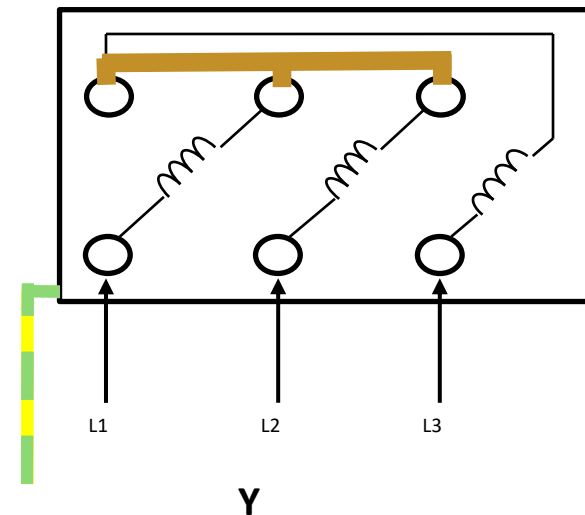
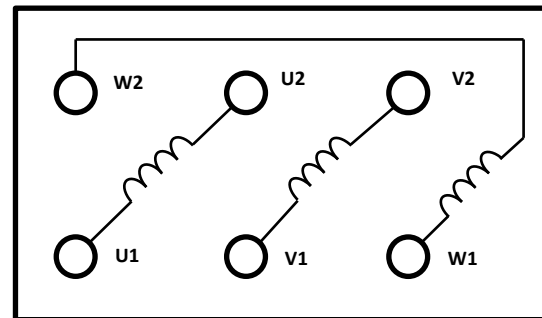
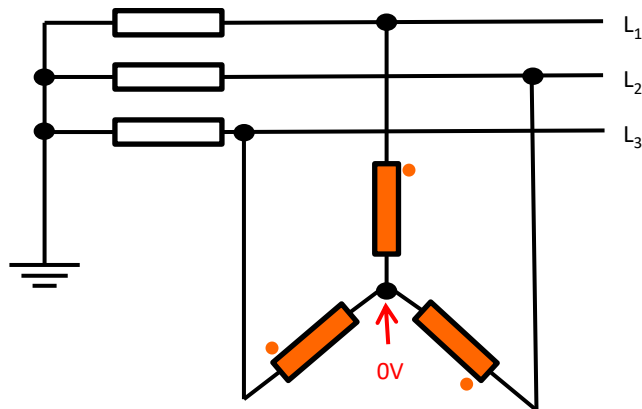
- Na každém vinutí je 230V
- Lze použít pro rozběhy díky nižším proudům
- Motory do výkonu 3kW

$$P_{\Delta} = 3P_Y$$

$$I_{\Delta} = 3I_Y$$

$$R_Y = R_1 + R_1 = 2R_1$$

$$I_Y = \frac{U_{sdr}}{2R_1}$$



Indukční třífázový motor s kotvou na krátko

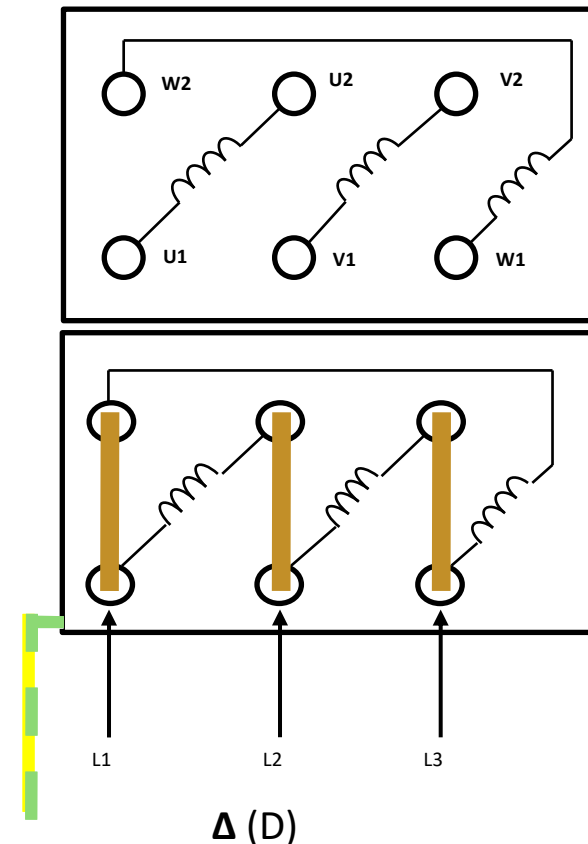
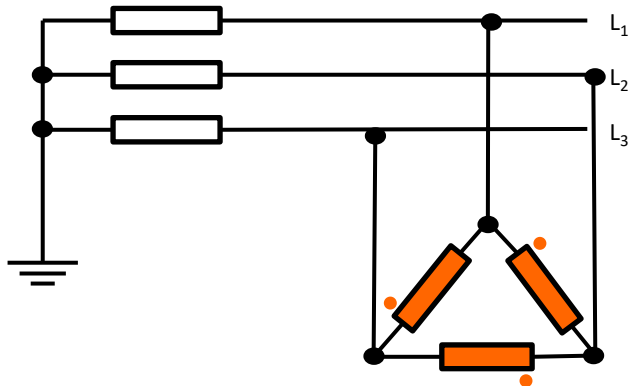
Zapojení motoru – Δ

Δ (D) - trojúhelník

- Na každém vinutí je 400V
- Větší proudy umožňují větší kroutící moment motoru

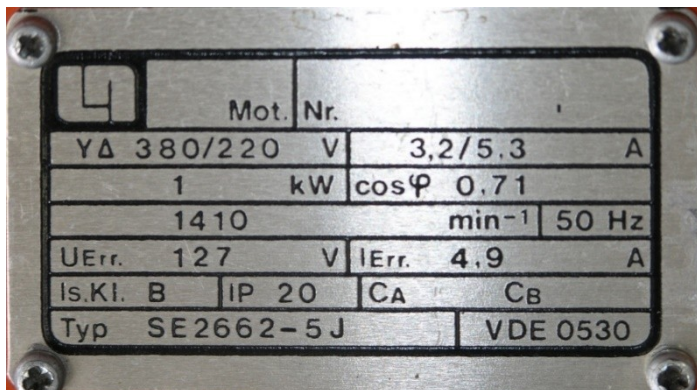
$$R_{\Delta} = \frac{R_1(R_1 + R_1)}{R_1 + R_1 + R_1} = \frac{2R_1}{3} \quad I_{\Delta} = 3I_Y \quad P_{\Delta} = 3P_Y$$

$$I_{\Delta} = \frac{3U_{sdr}}{2R_1}$$



Indukční třífázový motor s kotvou na krátko

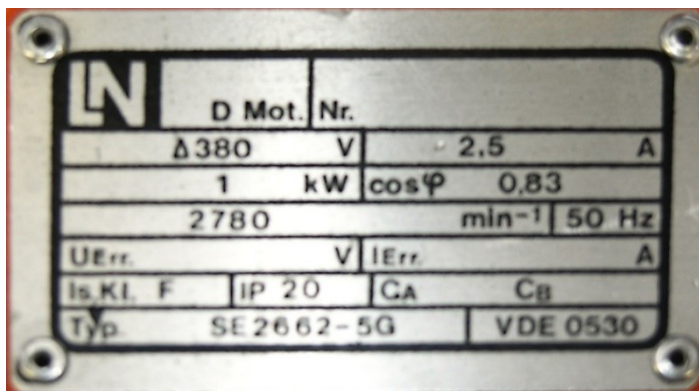
Zapojení motoru – Y- Δ



Mot. Nr.	
Y Δ 380/220 V	3,2/5.3 A
1 kW	cos φ 0.71
1410 min ⁻¹	50 Hz
U _{Err.} 127 V	I _{Err.} 4.9 A
Is.Kl. B	IP 20 CA CB
Typ SE2662-5J	VDE 0530

Motor Δ /Y 230/400 V (Y/ Δ 400/230 V)

- Nelze bez zničení zapojit do Δ .
- každá z cívek je připojena na $U_s = 400$ V \rightarrow velký proud zničí vinutí.



D Mot. Nr.	
Δ 380 V	2.5 A
1 kW	cos φ 0.83
2780 min ⁻¹	50 Hz
U _{Err.} V	I _{Err.} A
Is.Kl. F	IP 20 CA CB
Typ SE2662-5G	VDE 0530

Δ /Y 400/690 V (Y/ Δ 690/400 V) nebo Δ 400 V.

- Motor má štítkový výkon a odebírá odpovídající proud I.
- Zapojení motoru do Y
- Na sériovém spojení dvojice cívek je napětí 400 V, obvodem prochází proud $I_Y = I_D/3$ a motor má třetinový výkon.
- Pro zapojení tohoto motoru do Y se jmenovitým výkonem by muselo být v síti napětí $U = \sqrt{3} \cdot 400 = 690$ V.

Indukční třífázový motor s kotvou na krátko

Diagnostika

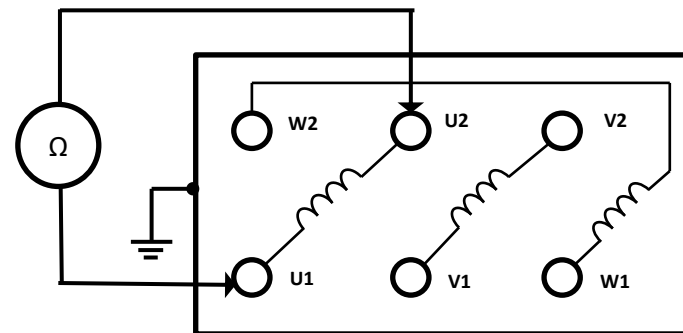
Ohmmetr

- Neporušenost vinutí
- Mezizávitový zkrat

- Dle výkonu motoru se jedná o odpor 0,1 Ω – desítky Ω
- Odpor všech cívek musí být stejný ($\pm 10\%$)

- ! Neměříme „propísknutím“ – při hodnotách desítek ohmů již akustická signalizace nereaguje

- **Měření všech odporů děláme vždy na odpojeném zařízení**



Indukční třífázový motor s kotvou na krátko

Diagnostika

Megmet (megaohmmeter)

- Izolační odpor proti chráněné části
- Izolační odpor mezi vinutími

Zkušební napětí zhruba 2x vyšší než U_{max} na zařízení

Příčiny poruch vinutí, izolace a klece

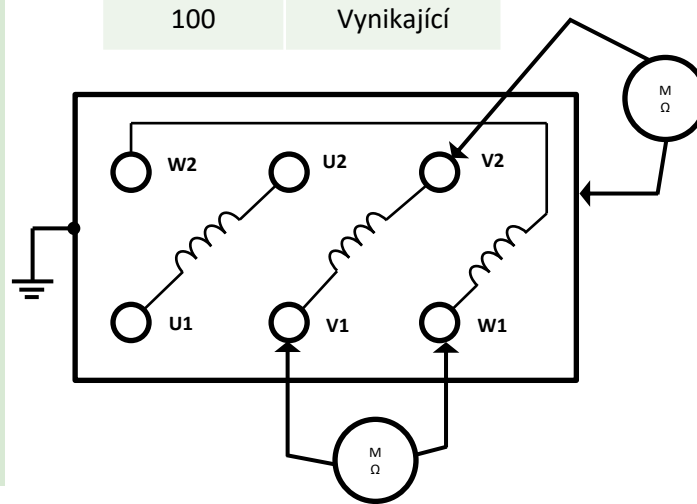
- Dlouhodobé proudové přetěžování
- Časté opakované zatěžování a následné ochlazování (rozpínavost mědi a laku)
- Mechanické zadření – nečistoty (malá vzduchová mezera mezi statorem a rotorem)
- Zadřený či poškozený ventilátor (žádné vlastní chlazení)
- Opatřebování ložisek (vnější síly na hřídeli a otřesy)

Prasklá klec

- Méně častá závada – neměřitelná

Měření všech odporů provádíme na odpojeném zařízení !!!

Izolační odpor(M Ω)	Izolační úroveň
<2	Špatný
2-5	Kritický
5-10	Abnormální
10-50	Dobrý
50-100	Velmi dobře
100	Vynikající



Indukční třífázový motor s kotvou na krátko

Diagnostika

Provozní napětí AC (V)	Zkušební napětí (V)	Druh spotřebiče
24	50	malé napětí
48	100	malé napětí
110	250	nízké napětí
230	500	jednofázové
400	1000	třífázové

Chování motoru nakrátko:

- **Vypnutí jedné fáze za chodu** – snížení výkonu, hluk
- **Vypnutí jedné fáze při rozběhu** – motor se neroztočí !!!
- **Vypnutí dvou fází** – motor se neroztočí nebo zastaví
- **Záběrový (rozběhový) proud** – $10 \div 20$ x větší než proud jmenovitý. Stejná hodnota jako proud nakrátko - motor zabrzděn
- Pro síťová napětí musí mít normou stanovenou minimální hodnotu **Ri $\geq 20M\Omega$**

Mechanické závady:

- Kryt svorkovnice
- Patky
- Příruba
- Ventilátor
- Ložiska
- Vyvážení
- Povolené/nedotažené šrouby



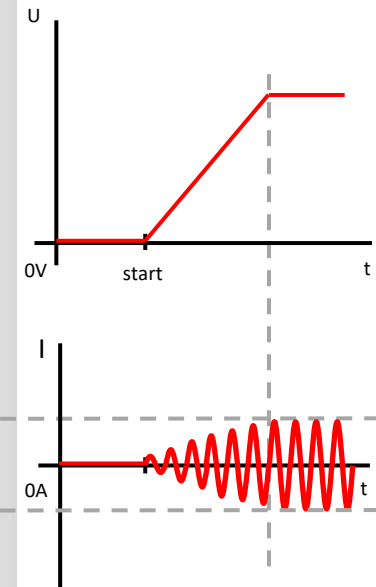
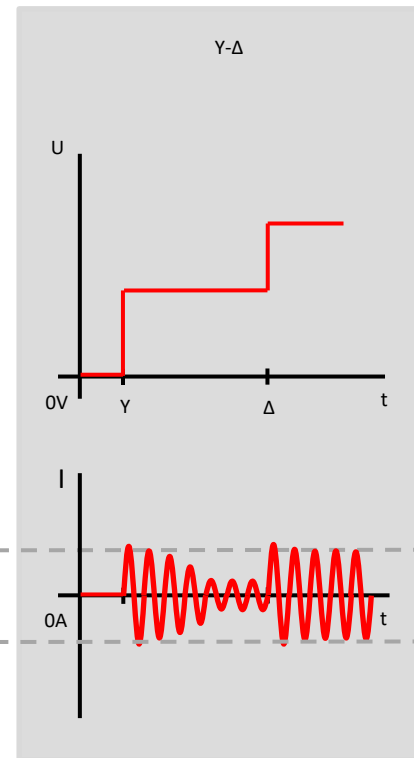
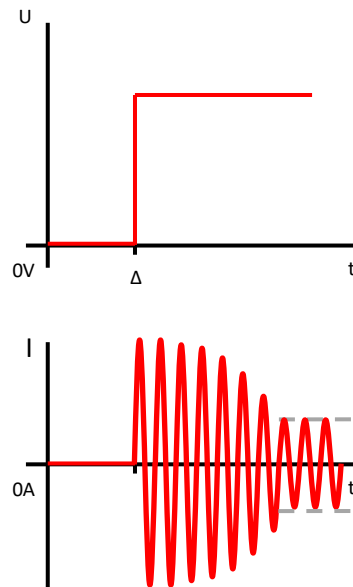
Indukční třífázový motor s kotvou na krátko

Řízení motoru – Softstartér

- Zařízení pro řízení rozběhu elektromotorů pomocí plynulého zvyšování napětí na vstupu motoru
- Softstartér řídí velikost a strmost proudu a napětí do motoru
- Po dosažení plného napětí již nezasahuje do řízení motoru

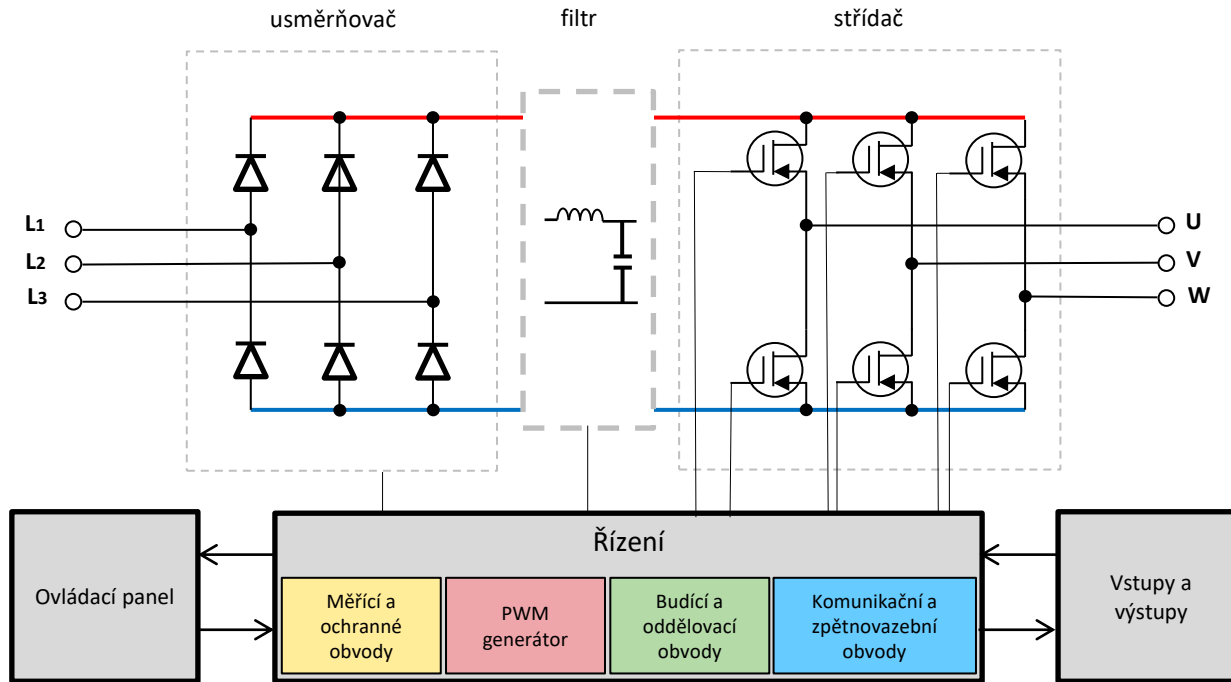


Kompaktní řešení Siemens



Indukční třífázový motor s kotvou na krátko

Řízení motoru – Frekvenční měnič



Frekvenční měniče si vždy vstupní AC napětí usměrní

- 3f frekvenční měnič – cca 570 V
- 1f frekvenční měnič – cca 325 V
- Připojení na DC zdroj – napětí akumulátoru (cca stovky voltů)

Usměrněné napětí pak spíná dle technických a uživatelských omezení

- 0,1 – 1000 Hz ($f > 590$ Hz je omezeno nařízením EU)

Dle složitosti (vybavení a ceny) měniče

- Množství nastavitelných parametrů
- Programování uživatelských aplikací
- Diagnostika měniče i motoru
- Doplnky a rozšíření – sběrnice, vstupy/výstupy, ovládací panely
- Různé výkonové verze

Indukční třífázový motor s kotvou na krátko

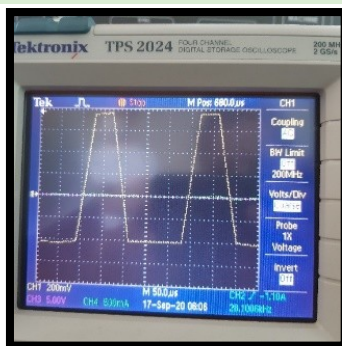
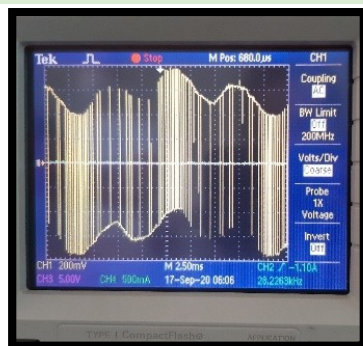
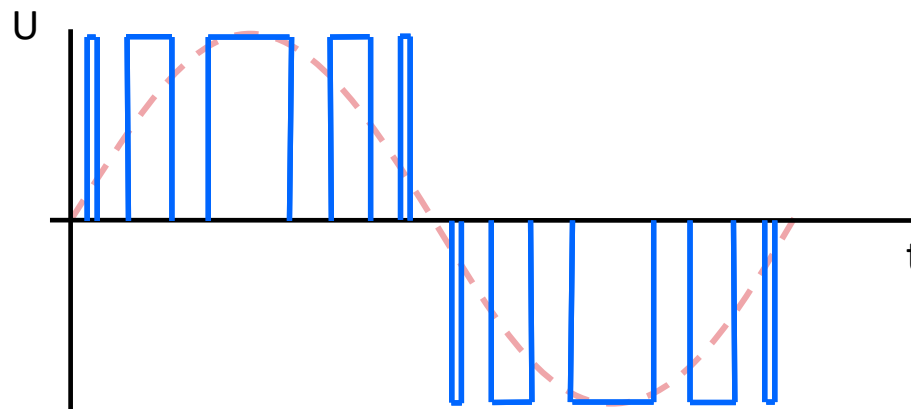
Frekvenční měnič - PWM

Na výstupu každé fáze frekvenčního měniče je sled napěťových impulzů jejichž **výkon** a **frekvence** odpovídá stejné hodnotě požadovaného sinusového průběhu

- Impulzy stejného napětí s různou šířkou
- Regulace výkonu (šíře impulzů)
- Regulace frekvence (rychlost změny polarity impulzů)
- Výkonově (teplotně) méně náročné na řízení (tranzistor zcela otevřen/zavřen)
- Frekvence PWM je reálně v řádech kHz
- PWM je zdrojem vysokofrekvenčního rušení

U frekvenčních měničů tedy rozeznáváme DVĚ frekvence

- Frekvence PWM (stovky až tisíce Hz)
- Výsledná frekvence magnetického pole statoru (jednotky až stovky Hz)



Záznam osciloskopu

Typ FM:
MOVIDRIVE B

PWM frekvence: 4kHz

Třífázový synchronní motor

Popis:

- Synchronní motor má otáčky hřídele stejné, jako je točivé pole ve statoru.
- **Stator** je napájen z třífázové sítě, stejně jako u asynchronních motorů
- **Rotor** se od asynchronního liší – místo klecového vinutí je v rotoru navinut elektromagnet, který je buzený stejnosměrným proudem.
- Rotor se natáčí vždy ve směru magnetického toku rotoru.

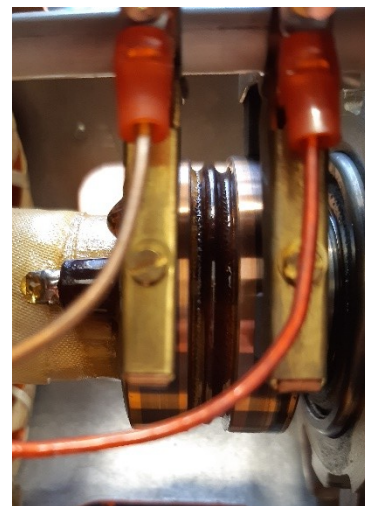
$$n_{\text{synch}} = \frac{60 \times f}{p} \left(\frac{\text{ot}}{\text{min}}, \text{Hz, pól. dvojice} \right)$$



Třífázový synchronní motor

Popis:

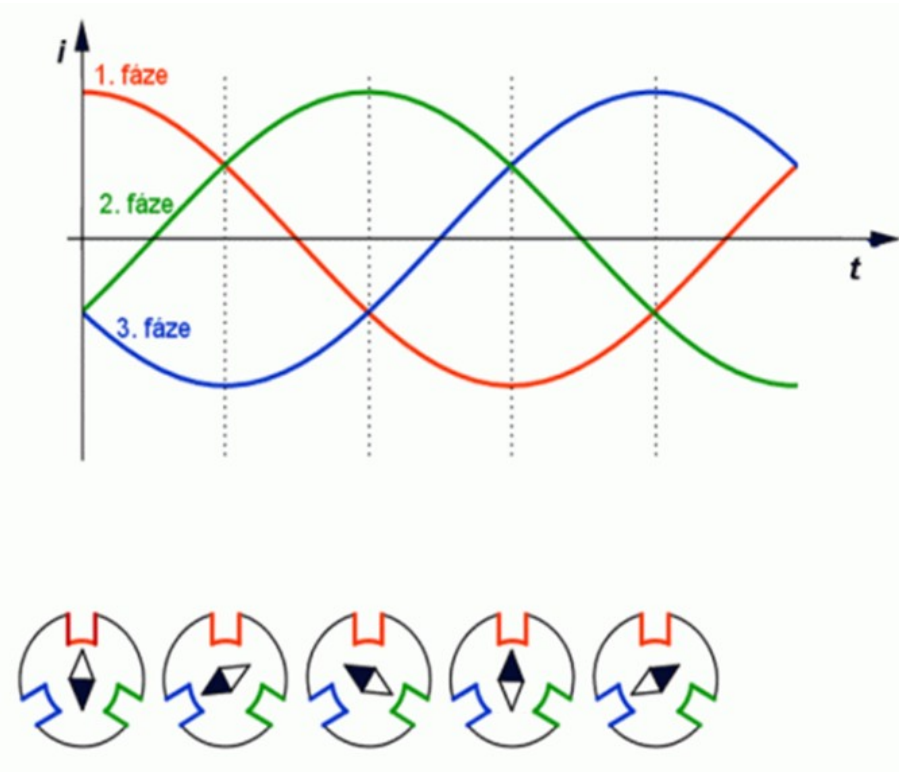
- **Elektromagnet** je napájen buď přímo přes sběrné kroužky, nebo má pomocné vinutí a usměrňovač přímo na hřídeli motoru.
- **Kroužky** - ze slitin mědi s hladkým povrchem jsou izolovaně nalisovány na hřídeli rotoru a představují pouze pohyblivý přívod proudu do rotoru.
- Největší napětí je v cívce, které je nejbližší magnetický pól rotoru.
- Synchronní motor na rozdíl od asynchronního nereaguje na zvýšený moment na hřídeli snížením otáček, ale pouze natočením magnetického pole rotoru vůči magnetickému poli statoru.
- Při přetížení se může motor zastavit (magnetické pole statoru rotoru ujede) a už se samovolně neroztočí.



Synchronní třífázový motor

Princip:

- Cívky statoru jsou vzájemně posunuty o 120° , což je dáno fázovým posunem jednotlivých fází v síti, který je také 120° .
- Stejnsměrný proud procházející vinutím rotoru vybudí sinusové magnetické pole ve vzduchové mezeře.
- Siločáry vystupují ze severního pólu elektromagnetu rotoru a uzavírají se přes magnetický obvod statoru do jižního pólu rotoru.
- Při otáčení rotorem otáčkami n_1 se magnetické pole rotoru otáčí stejnou rychlostí a siločáry protínající cívky statoru indukují v cívkách elektrické napětí.
- Největší napětí je v cívce., které je nejbližší magnetický pól rotoru.



Synchronní třífázový motor

Rozběh synchronního motoru

- Nevýhodou synchronního motoru je, že se neroztočí při přímém připojení na síť.
- Magnetické pole statoru jakoby rotoru ujede.
- Střídání magnetických pólů statoru a rotoru je tak rychlé, že se nevyvolá silový účinek.

Pomocný asynchronní motor

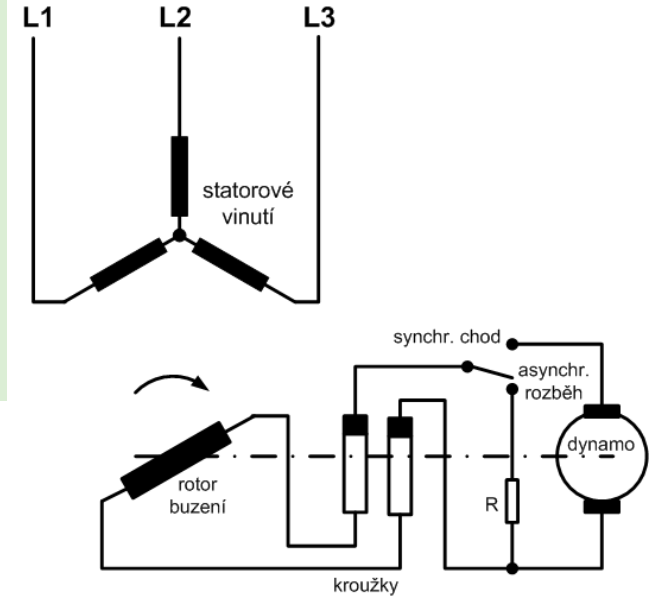
- Pomocí asynchronního motoru roztočíme synchronní motor.
- **Pod synchronní otáčky:** $95 \div 97\%$ synchronních otáček motoru.
- Na hřídeli synchronního motoru musí být malá zátěž.
- Po dosažení pod synchronních otáček se připojí na síť nabuzený synchronní motor a vypne se pomocný motor.

Synchronní třífázový motor

Rozběh synchronního motoru

Asynchronní rozběh - pouze motor naprázdno!!!

- Synchronní motor se zapojí jako motor nakrátko zkratováním budicího vinutí pomocí odporu.
- Vznikne jednoduchá kotva nakrátko asynchronního motoru.
- Dosažení pod synchronních otáček - odstraní zkratování budicího vinutí
- Nabuzení motoru a připojení na síť
- Motor můžeme postupně zatížit



Synchronní třífázový motor

Rozběh synchronního motoru

Kmitočtový rozběh

- Stator je napájen z třífázového zdroje proměnného kmitočtu počínaje od $f=0$.
- Střídání magnetických polí statoru a nabuzeného rotoru je dostatečně pomalé, vytvoří se dostatečně velké silové reakce mezi magnetickými póly potřebné pro uvedení synchronního motoru do chodu.
- Po dokončení rozběhu je motor napájen proudem požadovaného kmitočtu
- Pro rozběh se používá frekvenční měnič



Synchronní třífázový motor

Řízení otáček - Pouze kmitočtově – frekvenčním měničem

Reverzace – Záměnou dvou fází při zastaveném motoru – nebezpečí velkých proudových nárazů.

Brzdění

- **generátorový režim** - nabuzený motor se odpojí od sítě a vhodným R se po odpojení buzení zkratuje jeho budicí vinutí nebo **rekuperace**.
- **odbuzení (postupné)** odlehčeného motoru a jeho odpojení od sítě.
- **Neodlehčený synchronní motor se nesmí odbudit!!**
- **Setrvačná hmota vyvolá generátorový stav**

Synchronní třífázový motor

Diagnostika

- Izolační stav statorových fázových vinutí proti chráněné části
- Izolační stav statorových fázových vinutí navzájem – nutno rozpojit cívky vinutí!
- Mezizávitový zkrat statorových vinutí
- Mezizávitový zkrat budicích vinutí
- Odpor vinutí fází i buzení
- Kroužky rotoru
- Komutátor budicího dynama
- Izolační stavy a úplnosti vinutí dynama
- Stav budicího systému (transformátor, usměrňovač a jejich ovládání)

Synchronní třífázový motor

Použití:

- Konstantní otáčky v širokém rozsahu zatížení – turbokompresory, čerpadla, ventilátory
- Malá četnost startu a reverzace
- Synchronní motory malých výkonů 100 W až jednotky kW se používají v automatizační technice k pohonu obráběcích strojů
- Řízení je výhradně s využitím frekvenčního měniče
- Kompenzace $\cos\phi$ rozvodné soustavy – doplňková funkce

Stejnoseměrné (DC) motory

Konstrukce a princip

Motor je složen ze dvou hlavních částí:

- Vnější nepohybující se část – **stator** jehož součástí jsou patky nebo příruba pro uchycení motoru, ložiskové štíty a nástavba pro umístění a zakrytování svorkovnice
- Vnitřní pohybuující se část – **rotor**, který je uložen v ložiskách, přenos hnačích sil pak zabezpečuje hřídel

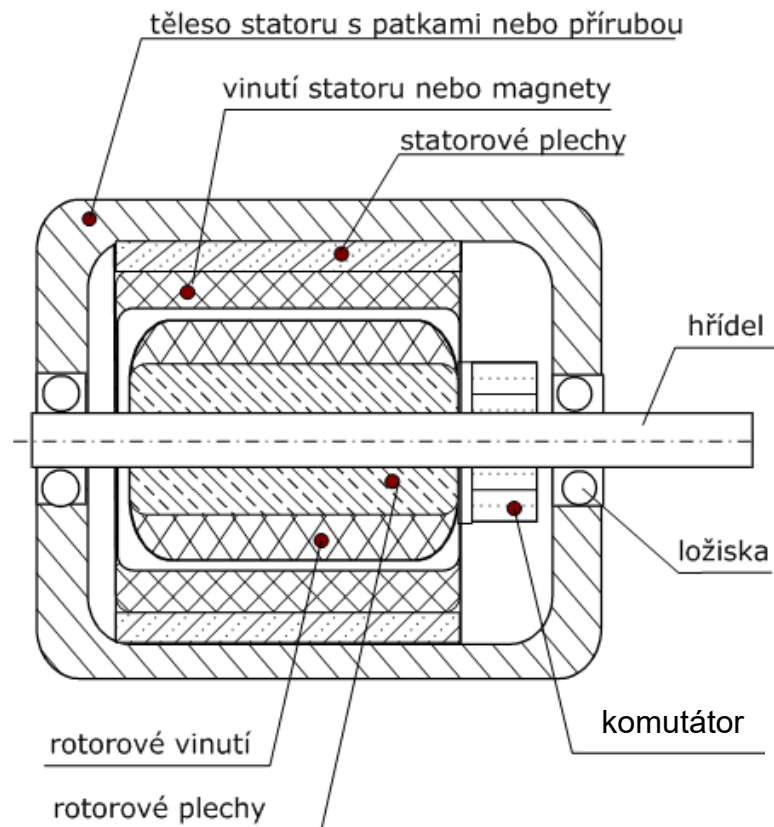
Princip elektromotoru

- Interakce (vzájemné působení) dvojice magnetických polí
- Pole rotoru
- Pole statoru

Magnetický obvod motoru

je složen z:

- Magnetického obvodu statoru
- Magnetického obvodu rotoru
- Soustavy vzduchových mezer



Stejnoseměrné (DC) motory

Stator

- **Permanentní magnety** – jeden nebo několik párů permanentních magnetů spolu s magnetickými nástavci vytváří část magnetického obvodu motoru. Magnetický obvod statoru je soubor magnetických pólů - střídají se S - J.
- **Vinutí –cívky (elektromagnety)** – jedna nebo soustava cívek, které spolu s feromagnetickým jádrem vytváří soubor elektromagnetů.
- Cívky jsou izolovaně uloženy v podélných drážkách nebo na jednoduchých pólech statoru.
- Cívky jsou elektricky zapojeny tak, aby tvořily střídající se póly magnetů.
- Zapojení cívek je až na několik výjimek pevně dáno konkrétním určením motoru, změna zapojení je prakticky vyloučena.
- Vinutí jako celek je zapojeno na odpovídající svorkovnici, která pak umožňuje připojení motoru na rozvodnou síť nebo příslušné řídicí systémy.
- **Magnetický obvod statoru** - složen z navzájem izolovaných plechů tzv. dynamoplechy (Fe s přísadou Si a dalších prvků) které vynikají úzkou hysterezní smyčkou. Svazek plechů s vinutím je nalisován do kostry statoru.



Stejnoseměrné (DC) motory

Rotor

Je tvořen:

- Hřídel s ložisky
 - Magnetickým obvodem - svazek plechů nalisovaných na hřídel.
 - Vinutím - v podélných drážkách rotoru.
 - Pro rotor se též vžil označení kotva.
-
- Proud do vinutí rotoru je přiváděn pomocí kontaktních systémů (sběrače), který sestává z komutátoru (přepínače) a kartáčů (uhlíků)

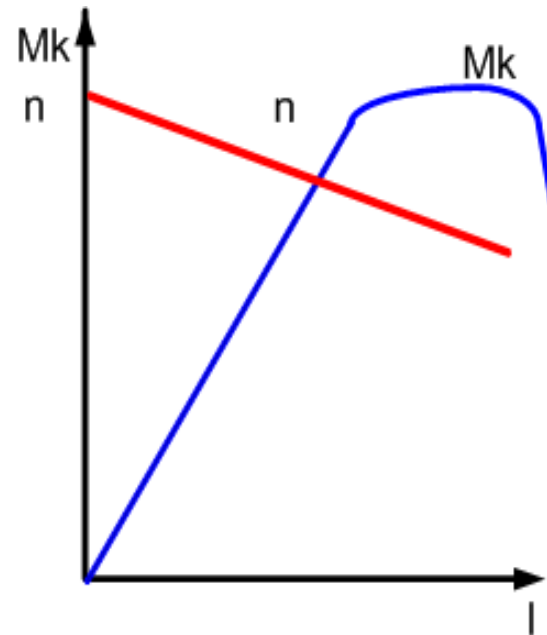
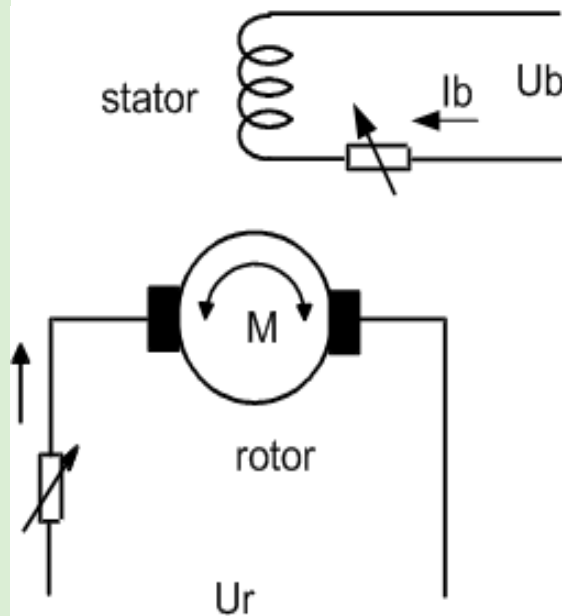


Motor s cizím buzením

- Permanentní magnet nahrazen elektromagnetem → budící vinutí
- Budící vinutí – malý I_b * velký n $H \rightarrow B$
- Dva napájecí nezávislé zdroje
- **Řízení otáček** – I_b menší $I_b \rightarrow$ větší n (motor se nesmí odbudit $n \rightarrow \infty$)
- **Řízení M_k** – proud I_r , ovlivňuje výrazně i I_b
- **Reverzace** – změna polarity napájení U_b nebo U_r
- **Brzdění** – generátorový režim do R nebo rekuperace, (buzení odpojit po zastavení motoru)
- **Použití** – CNC stroje (ne nadlouho)
- **Výkon** – 10 W ÷ 1 000 kW
- **Napětí** – 100 ÷ 1 500 V

Závady:

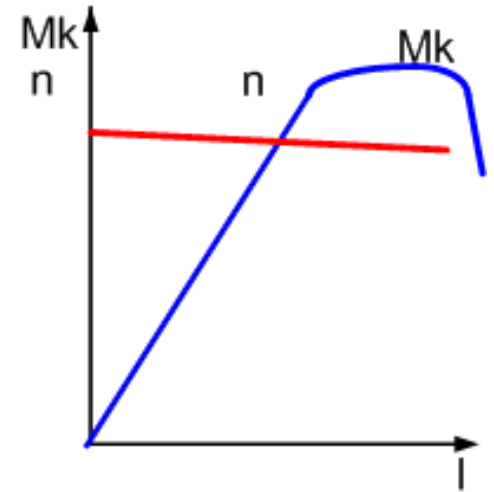
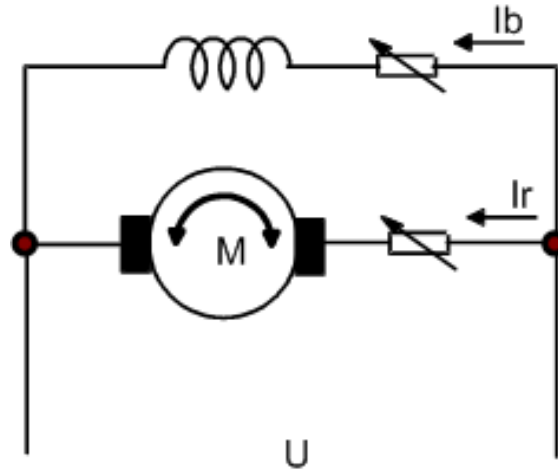
- Vinutí kotvy a buzení
- Komutátor, kartáče
- ložiska



Derivační motor

Derivační – paralelní

- jeden napájecí zdroj
- Buzení a kotva paralelně (R - řízení n a M_k)
- **Řízení otáček:** Napájecí proud (napětí) nebo I_b
- **Řízené M_k :** Napájecí proud (napětí) nebo I_r
- **Reverzace:** U standardního motoru nelze (polarita I_r nebo I_b)
- **Brzdění** generátorový režim protiproudem
- **Použití:** Vyskytuje se výjimečně
- **Napájení:** 6 V ÷ 600 V
- **Výkon:** 10 W ÷ 30 kW
- **Závady:** Jako u motoru s cizím buzením

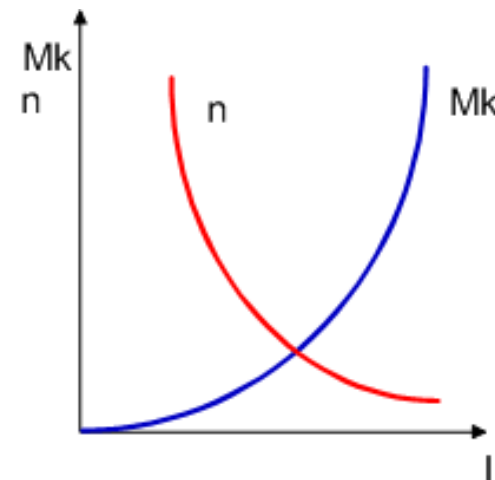
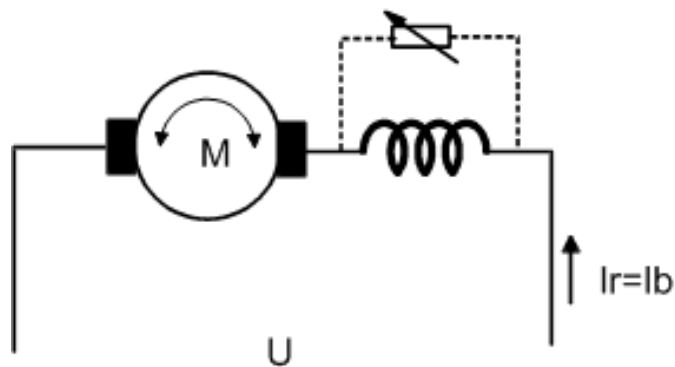


Sériový motor

- Motor nelze provozovat naprázdno $n \rightarrow \infty$
- **$I_r = I_b$** velké proudy buzením, nesnadné řízení
- **Otáčky a M_k** : Velikost I (odporem u buzení)
- **Reverzace**: Změna polarity proudu I_b nebo I .
Běžně nelze
- **Použití**: Trakční motor – řízení napětím, startér,
- **Výkon**: 500 W ÷ 1 000 kW
- **Napětí**: 12 V ÷ 1 500 V

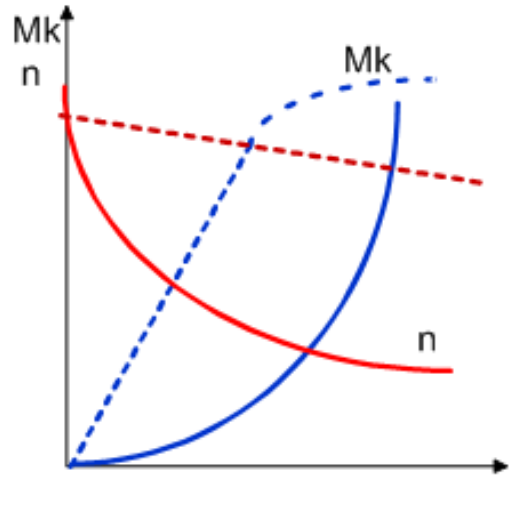
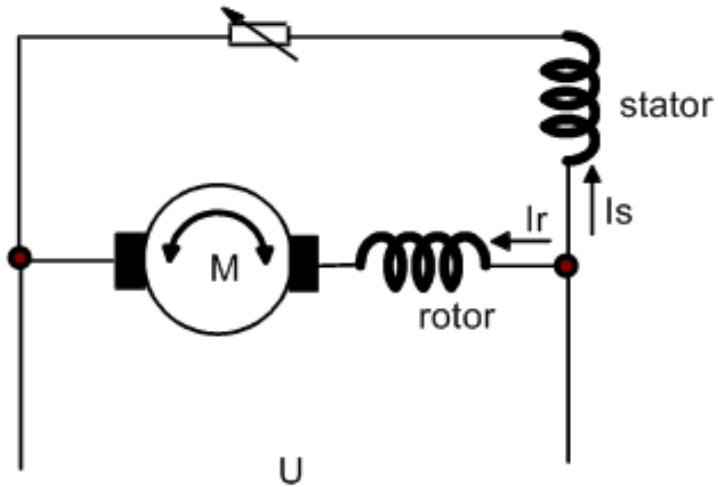
Závady:

- Izolace vinutí
- Přerušení a závitové zkratky
- Komutátor a kartáče



Kompaundní motor

- Kompaundní – smíšený = sériově-paralelní
- Chování určuje poměr sériové a derivační složky
- **Motor plně nahrazen motory AC nebo řízeným motorem s cizím buzením**



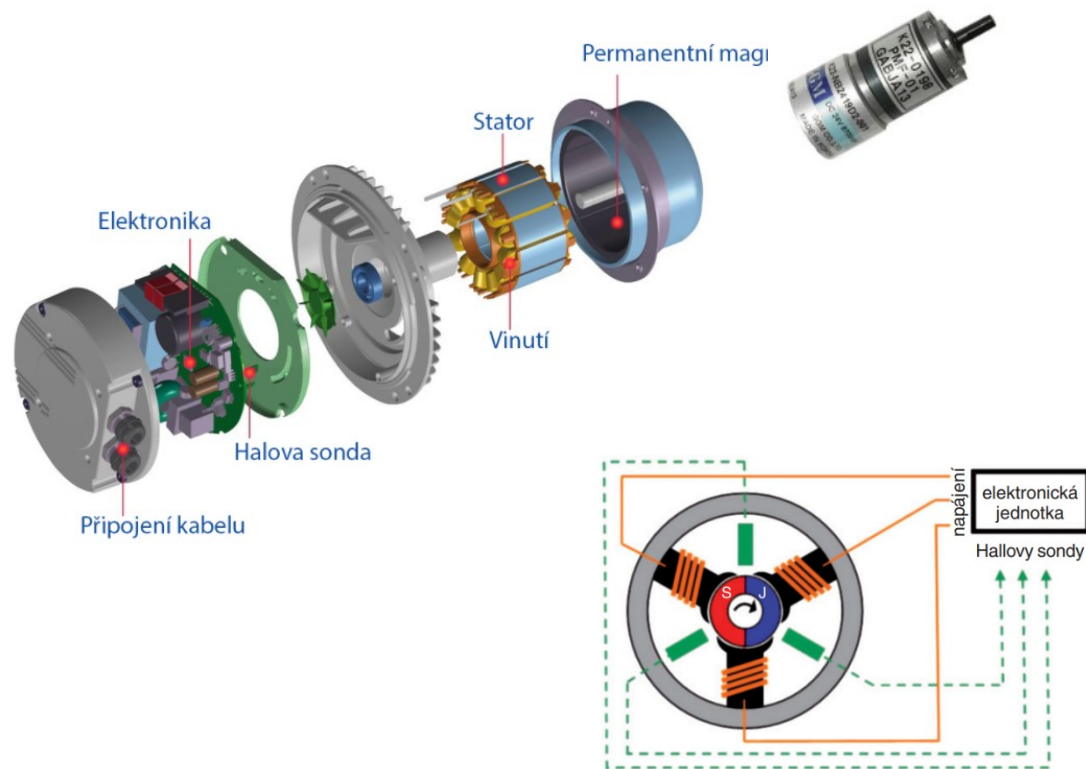
Bezkartáčový stejnosměrný motor – Brushless DC electric motor

DC motor - elektronicky komutovaný stejnosměrný motor

- Typ synchronního stejnosměrného motoru
- **BL motor** nebo **BLDC motor** - **elektronicky komutovaný motor**
- Místo komutátoru je střídač vytvářející pulzy do cívek statoru tak, aby se motor otáčel - vytváří točivé magnetické pole
- Rotor tvoří permanentní magnety
- Hallové sondy pro detekci pozice rotoru
- BLDC motory jsou na jednofázové, dvoufázové a třífázové konfiguraci
- K funkci potřebují řízení (integrované nebo externí)

Vlastnosti:

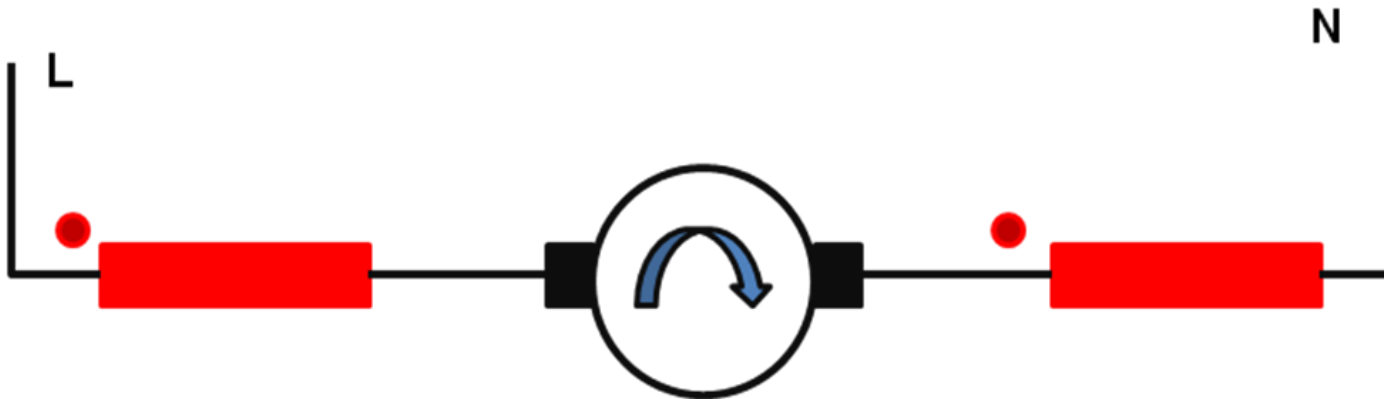
- Vysoká životnost díky elektronické komutaci
- Velká účinnost
- Široký rozsah regulace otáček
- Bezúdržbový provoz
- Kompaktní design a minimální rozměry
- Nízká hlučnost a vibrace
- Nízká spotřeba
- Vhodné pro napájení z baterie



Jednofázové motory

Univerzální motor

- Nejrozšířenější mezi jednofázovými motory
- Napájen může být DC i AC proudem.
- Při zapojení na AC el. napětí slouží komutátor jako usměrňovač.
- Při zapojení na DC el. napětí slouží komutátor jako střídač.
- Použití ve většině ručního nářadí a spotřebičích (vrtačky, brusky, vysavače)
- Výkon 20 – 2000 W
- Zdrojem elektromagnetického rušení.



Jednofázové (AC) motory

Univerzální motor

- **Reverzace**
 - Změnou orientace proudu rotorem.
 - Změnou orientace proudu statorového vinutí – změna smyslu vinutí statoru
- **Řízení otáček**
 - Velikostí proudu (napětí)
 - Tyristotorový nebo triakový regulátor
- **Diagnostika**
 - **Izolační stav** vinutí statoru i rotoru proti chráněné části (500V/20MΩ)
 - **Mezizávitový zkrat** vinutí rotoru a statoru
 - **Odpor vinutí** – závisí na výkonu motoru
 - **Zapojení vinutí** – smysl sériově zapojených vinutí statoru
 - **Komutátor** – stav lamel a sběracího zařízení (uhlíky)

Jednofázové motory

Univerzální motor

Stator

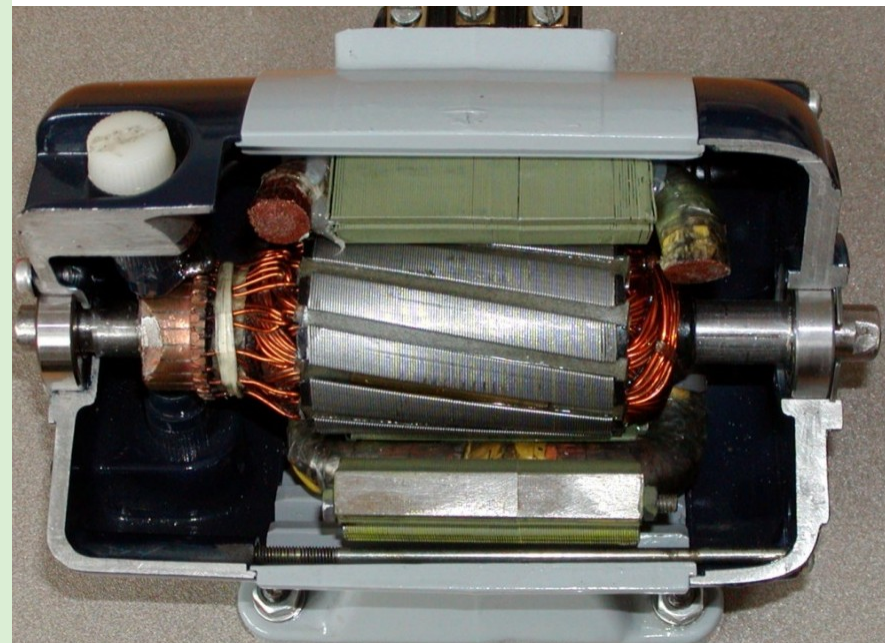
Dvě vinutí na pólových nástavcích - vyniklé póly.
Vinutí vytváří jeden magnetický pár.
Cívky jsou zapojeny v sérii i s rotorem, tak aby vytvořily magnetické póly.
Magnetický obvod - dynamoplechy.

Rotor

Cívky jsou uloženy v podélných drážkách rotoru.
Vývody cívek jsou připojeny na lamely komutátoru.
Počet pólu rotoru (lamel komutátoru) určuje maximální otáčky motoru.
Magnetický obvod - dynamoplechy.

Komutátor

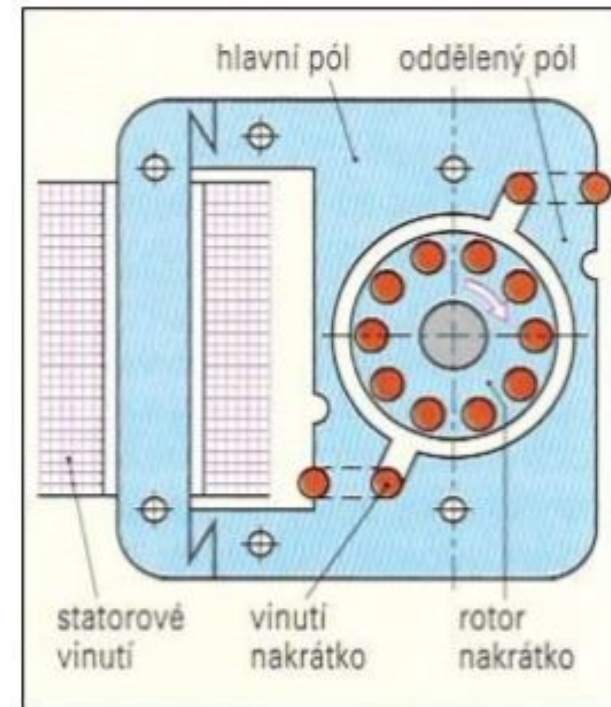
Je složen z **lamel** podélných k ose rotoru.
Jednotlivé lamely jsou navzájem izolované a izolovaně namontované na rotoru.
Pracuje jako přepínač, který zajišťuje správnou orientaci proudu do rotorového vinutí.
Přepíná proud pouze do jedné cívky, která má z hlediska maximální síly na hřídeli optimální polohu vůči statoru.
Funkci spínání vzniká na komutátoru (cívkách) vysoké napětí a tím oblouk (opalování) vlivem elektromagnetické indukce.



Jednofázové motory

Motor se stíněným pólem

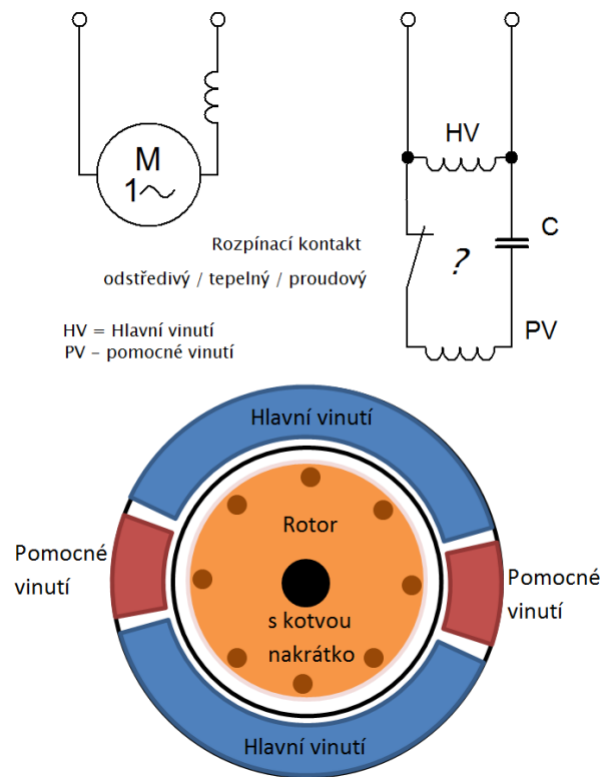
- Vytváří točivé magnetické pole úpravou magnetického obvodu – stíněným pólem.
- Stíněný pól se vytváří závitem nakrátko na části magnetického pólu statoru.
- **Hlavní a stíněné póly jsou dva** navzájem posunuty o 180° v magnetickém prostoru.
- Motory se stíněným pólem se používají pro velmi jednoduché pohony – ventilátor.
- **Rychloběžný – asynchronní, 2 póly, 300 W**
- **Pomaloběžný - synchronní, 10-16 pólů, 1-3 W**



Jednofázové motory

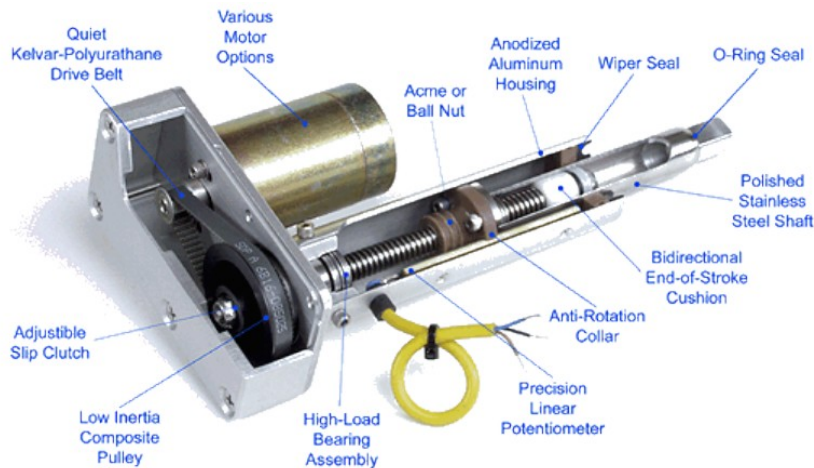
Motor s pomocnou fází

- Pomocná – rozběhová fáze spolu s kondenzátorem nebo odporem slouží k **vytvoření točivého magnetického pole**.
- Proud v rotoru vzniká magnetickou indukcí
- Po rozběhu motoru je obvod pomocné fáze odpojen odstředivým spínačem na hřídeli motoru
- Výjimkou je motor s trvale připojeným kondenzátorem
- **Reverzace** – změnou orientace proudu ve fázích
- Nahrazen třífázovým indukčním motorem v jednofázovém zapojení.
- **Rozdělení:**
 - Odporový rozběh
 - Kapacitní rozběh
 - Rozběhový a trvalý kondenzátor C1
 - Trvale připojený kondenzátor



Lineární aktuátor

- **Aktuátor je lineární pohon** , který převádí rotační pohyb na přímočarý
- AC nebo DC motory
- Používá se pro nastavování, naklápění, zvedání
- Výhodou je přesnost polohování a řízení pohybu, jednoduchá montáž, malé zástavbové rozměry a nenáročná údržba



Obsah tohoto materiálu existuje také díky znalostem a přispění mých kolegů v oblasti elektrotechniky

Ing. František Knespl

Václav Vild

Tomáš Havrda

Renata Cihlářová

Děkuji