

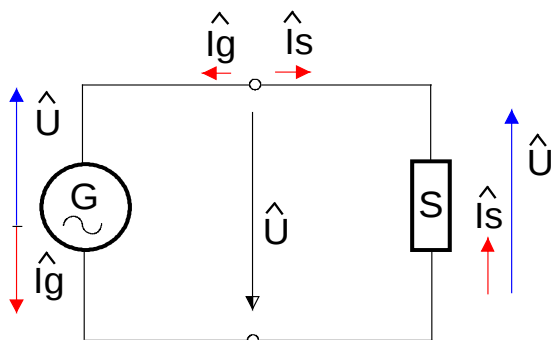


Elektrické stroje

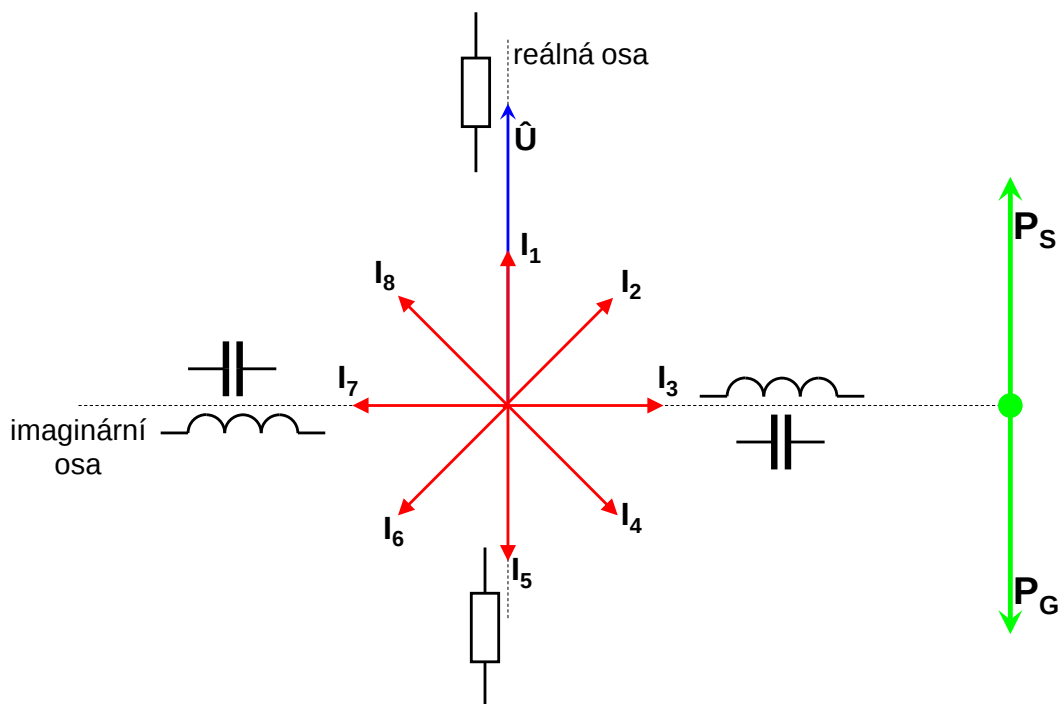
*Pracovní sešit pro 3.ročník
Silnoproudá elektrotechnika*



Zásady kreslení fázorových diagramů



Zásady kreslení fázorových diagramů





Jednofázový transformátor

Význam a použití transformátoru

- Jedná se o netočivý elektrický stroj
- Zabezpečuje přenos elektrické energie z místa výroby do místa spotřeby.
- Upravuje velikost napětí tak, aby byl přenos hospodárný

Transformátory rozdělujeme podle:

- počtu fází
- poměru vstupního a výstupního napětí
- způsobu zapojení vinutí
- uspořádání magnetického obvodu
- chlazení aktivních částí

Štítek transformátoru

- Typ transformátoru, výrobní číslo, rok výroby
- Počet fází a jejich zapojení
- Jmenovitý zdánlivý výkon
- Jmenovité vstupní a výstupní napětí
- Jmenovitý vstupní a výstupní proud
- Napětí nakrátko
- Jmenovitá frekvence
- Druh chlazení a chladiva
- Kryt transformátoru a třída izolace
- Celková hmotnost a hmotnost chladiva

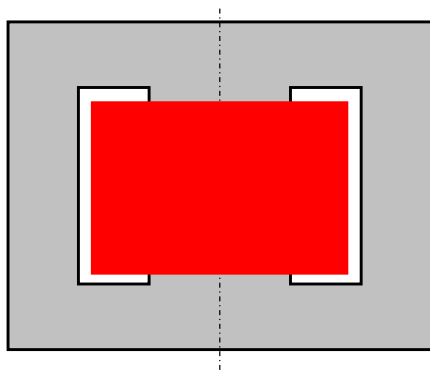
Štítek transformátoru

1									
2		TRANSFORMÁTOR		3	~	TYP		4	
5		6		7	Hz	ČÍS.		8	
KRYTÍ		9		CHLAZENÍ		10		TŘ. IZOL. 11	
								u _k %	
1	12	kVA	13	V	14	A	21		
2	15	kVA	16	V	17	A			
3	18	kVA	19	V	20	A			
VYROVNÁVACÍ VINUTÍ		22		kVA	23	V	24	A	
25		26		OLEJ		27		kg	
28		CELKOVÁ HMOTNOST		29		kg			
30		31		32					

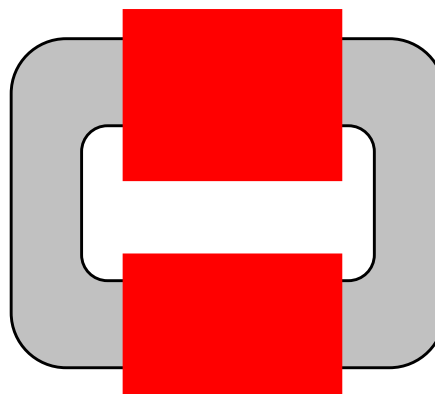
Konstrukce jednofázového transformátoru

1) Magnetický obvod

- * výkonové transformátory - vzájemně izolované transformátorové plechy
- * vf transformátory - magneticky měkké ferity



1)



2)

2) Primární (vstupní) vinutí

- měď, hliník (pro velké výkony)

3) Sekundární (výstupní) vinutí

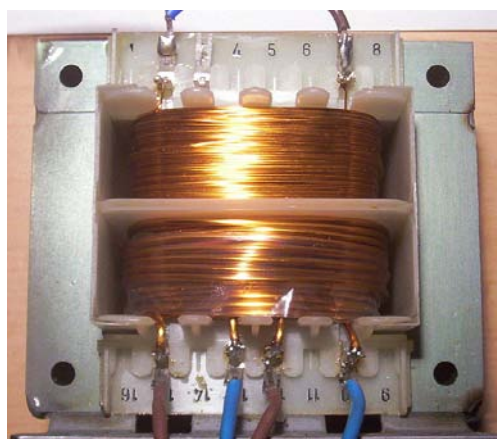
- měď, hliník (pro velké výkony)

4) Štítek transformátoru

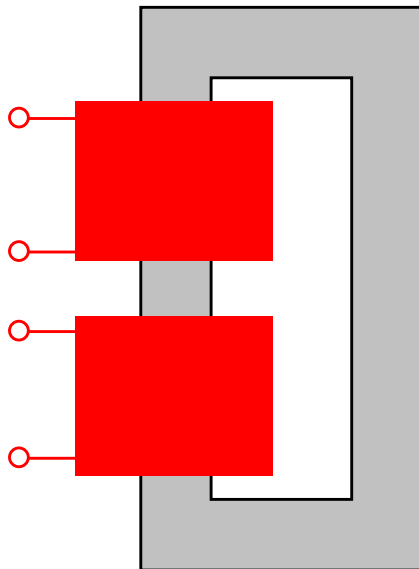
- vstupní a výstupní napětí, zdánlivý výkon

5) Mechanické části konstrukce

Ukázky jednofázových transformátorů



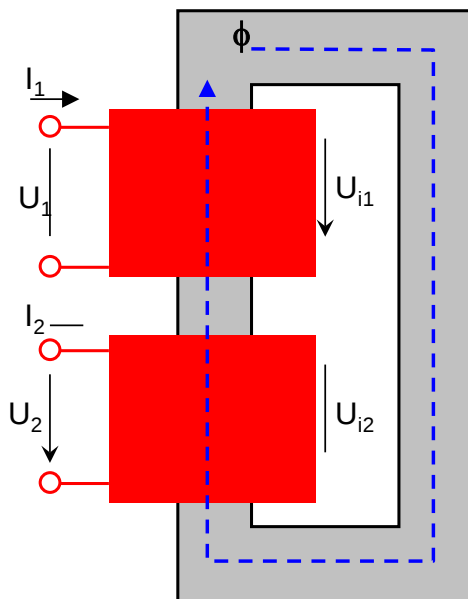
Princip transformátoru



Na jakém principu pracuje ?



Princip transformátoru



1. Vstupním vinutím protéká střídavý proud I_1

2. V magnetickém obvodu se vytvoří střídavý magnetický tok - ϕ

3. Na první cívce se indukuje napětí U_{i1} ?

4. Indukční tok prochází druhou cívkou

5. Na druhé cívce se indukuje napětí U_{i2} ?

6. Na výstupním vinutí se objeví napětí U_2

7. Po připojení zátěže protéká proud I_2 (spotřebitelský systém)

Převod transformátoru

- patří mezi základní parametry transformátoru

$$p =$$

Při zanedbání ztrát platí:

$$S_1 = S_2 \Rightarrow$$

Rozdělení podle převodu

snižovací

p

zvyšovací

p

oddělovací

p

$$p =$$

Prvky (parametry) náhradního schématu

Transformátor lze nahradit a analyzovat pomocí náhradního schématu, ve kterém musí být zahrnuty všechny vlivy, které ovlivňují chod transformátoru.

Náhradní schéma slouží k rozboru provozních stavů transformátoru.

Prvky (parametry) náhradního schématu:

- vinutí – podélné parametry

- * činný odpor vstupního a výstupního vinutí R_v (Ω)
- * rozptylová reaktance vstupního a výstupního vinutí X_σ (Ω)
respektuje magnetický tok, který se uzavírá mimo magnetický obvod

- magnetický obvod – příčné parametry

- * magnetizační reaktance X_μ (Ω)
respektuje konečnou magnetickou vodivost magnetického obvodu
- * odpor, který respektuje ztráty v železe R_{FE} (Ω)
zahrnuje ztráty vířivými proudy a ztráty hysterézní

Ideální transformátor

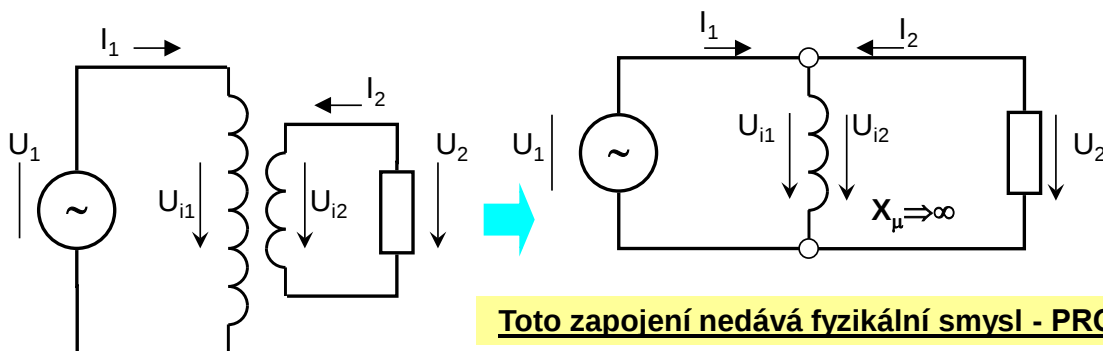
Předpoklady:

vinutí – podélné parametry

- * činný odpor vstupního a výstupního vinutí $R_v = 0$
- * rozptylová reaktance vstupního a výstupního vinutí $X_\sigma = 0$

magnetický obvod – příčné parametry

- * magnetizační reaktance $X_\mu \Rightarrow \infty$
- * odpor, který respektuje ztráty v železe $R_{FE} \Rightarrow \infty$



Toto zapojení nedává fyzikální smysl - PROČ

Ideální transformátor

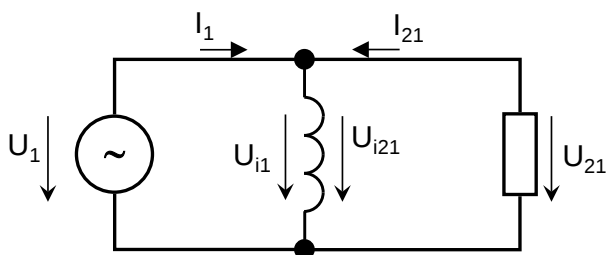
Proto je třeba přepočítat obecný transformátor na transformátor s $p = 1$

Platí : $I_1 * N_1 + I_2 * N_2 = 0$

$$\Rightarrow I_1 = -I_2 * \frac{N_2}{N_1} = -I_{21}$$

$$R_{v21} = R_{v2} * \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 = R_{v2} * p^2$$

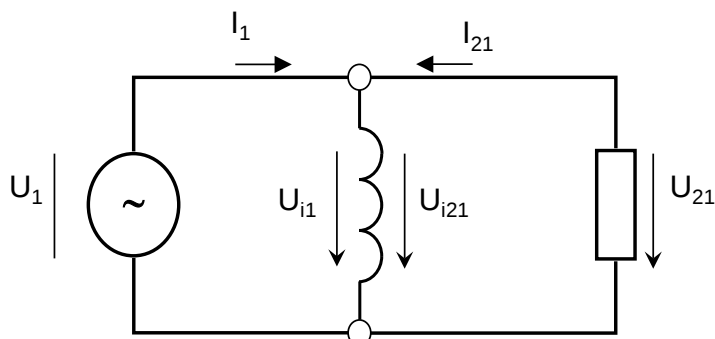
$$X_{\sigma 21} = X_{\sigma 2} * \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 = X_{\sigma 2} * p^2$$



$$I_{21} = I_2 * \frac{N_2}{N_1} = I_2 * \frac{1}{p}$$

$$U_1 = U_{21} \Rightarrow U_{21} = U_2 * \frac{N_1}{N_2} = U_2 * p$$

Fázorový diagram ideálního transformátoru



Předpoklad – zátěž RL

?

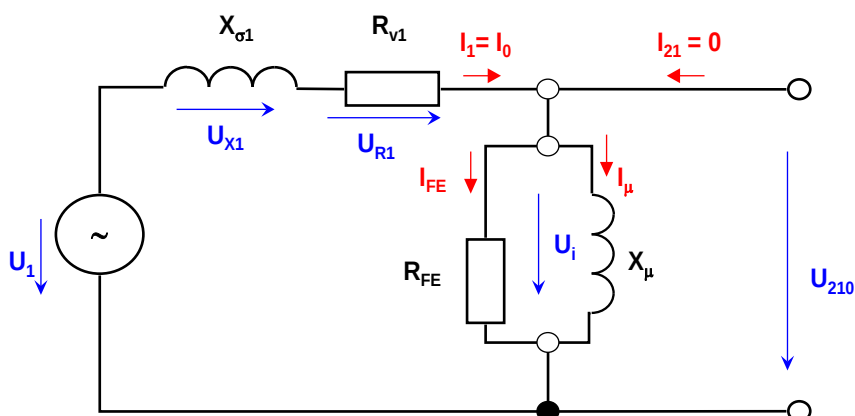
Úkol: Nakreslete fázorový
digram pro R zátěž

Transformátor naprázdno

veličiny označujeme indexem nula

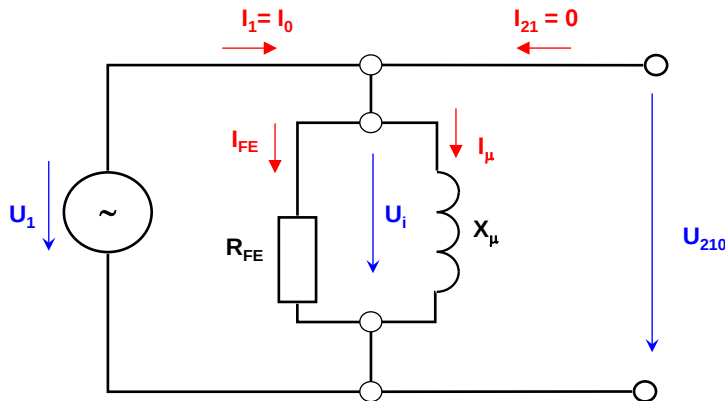
Vstupní vinutí je připojeno ke zdroji a výstupní vinutí je rozpojeno

Výstupním vinutím neprochází žádný proud $\Rightarrow$ parametry, které se vztahují k výstupnímu vinutí, se neprojeví.



Transformátor naprázdno

Proud naprázdno I_0 je v porovnání s jmenovitým proudem velmi malý
 $\Rightarrow$ vliv podélných parametrů je zanedbatelný $\Rightarrow$ s výjimkou nejmenších transformátorů lze podélné parametry zanedbat.



K1

Rozbor transformátoru naprázdno

Při chodu naprázdno určujeme

- * proud naprázdno a jeho složky I_{FE} , I_{μ}
- * ztráty naprázdno ΔP_0 a jeho složky ΔP_{FE} a ΔP_{J0}
- * účinnost naprázdno $\cos \varphi_0$

1. Ztráty naprázdno - ΔP_0 měřením naprázdno (wattmetr)

Příkon transformátoru v chodu naprázdno:

Dominantní jsou ztráty v železe (ztráty ve vinutí a dodatečné tvoří asi 2% ΔP_0 , dodatečné rostou s indukci až na 20% ΔP_{FE})

Výpočtem stanovíme ztráty ze vztahu :

Pro $B=1T$ je činitel $a=2$ a pro $f=50Hz$ je $b=1,25$

Účinnost v chodu naprázdno pro 1.f transf. :

Ztráty naprázdno - $\Delta P_0 = \Delta P_{FE}$

A) ztráty vířivými proudy

Vířivé proudy vznikají při střídavém magnetování elektricky vodivých látek, proudy způsobují tepelné ztráty

závisí na :

- Frekvenci – kvadratická závislost
- Indukci - kvadratická závislost
- Tloušťka feromagnetika – kvadratická závislost

Snížení ztrát - zvýšení elektrického odporu:

- * měrným odporem – do klasických obvodů příměs křemíku (až 5%), u vř transformátorů se používají feritová jádra (ferit je izolant).
- * snížením průřezu – magnetický obvod je sestaven ze vzájemně izolovaných plechů (tl. 0,5 nebo 0,35 mm)

B) ztráty hysterezní

vznikají při střídavém magnetování, způsobují tepelné ztráty

závisí na :

- Frekvenci – přímo úměrně
- ploše hysterezní smyčky – přímo úměrně

Snížení ztrát – orientované plechy

Rozbor transformátoru naprázdno

2. Proud naprázdno - I_0

jeho velikost je dána kvalitou magnetického obvodu a velikostí transformátoru

- | | |
|--|-----------------------------|
| * velmi malé transformátory (jednotky až desítky VA) | $I_0 = \text{až } 40\% I_n$ |
| * malé transformátory (stovky VA) | $I_0 \cong 10\% I_n$ |
| * střední transformátory (desítky kVA) | $I_0 \cong (4-6)\% I_n$ |
| * velké transformátory (stovky kVA a více) | $I_0 < 1\% I_n$ |

3. Účinník naprázdno - $\cos \varphi_0$

u různých typů a velikostí transformátorů je značně rozdílný.

Závisí především na ztrátách naprázdno (ΔP_{FE}) a velikosti proudu naprázdno (I_0).

Pohybuje se přibližně v rozsahu od 0,1 do 0,7.

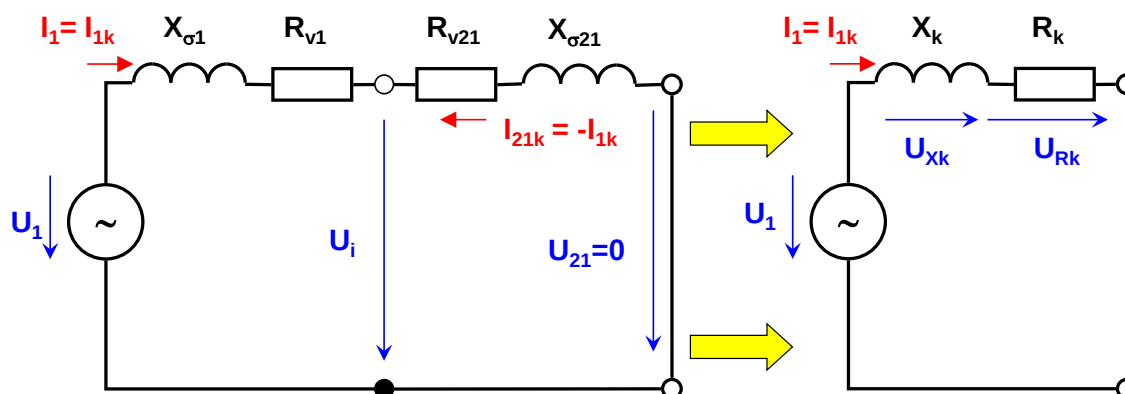
Účinník je malý, odběr jalové energie zatěžuje síť, způsobuje ztráty na vedení a úbytky napětí $\Rightarrow$ provoz transformátoru naprázdno by se měl co nejvíce omezit.

Transformátor nakrátko

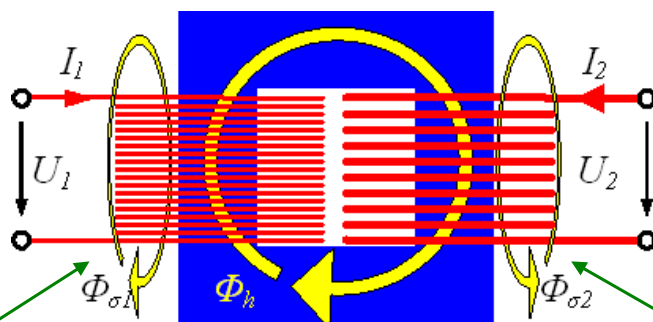
veličiny označujeme indexem k

Vstupní vinutí je připojeno ke zdroji a výstupní vinutí je spojeno nakrátko bezodporovou spojkou

Výstupním vinutím prochází maximální možný proud (10 až 20* vyšší než jmenovitý), proud naprázdno je vzhledem ke zkratovému proudu zanedbatelný (200 až 400* nižší) $\Rightarrow$ vliv příčných parametrů lze zanedbat.



Rozptyl transformátoru

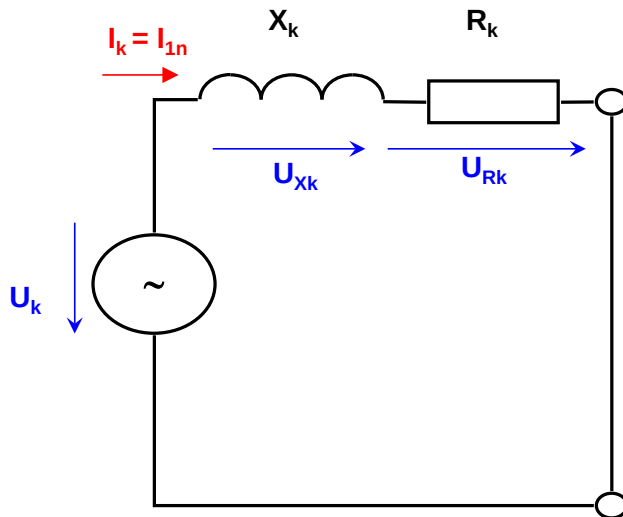


Rozptylový tok Φ_σ je tok, který se uzavírá mimo magnetický obvod transformátoru. Způsobuje „úbytek“ indukčního toku pro vytvoření indukovaného napětí $\Rightarrow$ má vliv na velikost napětí $\Rightarrow$ patří mezi podélné parametry.

Transformátor nakrátko

Měříme při sníženém napětí – napětí nakrátko U_k .

Je to napětí, které protlačí vinutími transformátoru v chodu nakrátko jmenovitý proud.



K1

Rozbor transformátoru nakrátko

1. Procentní napětí nakrátko transformátoru - $u_{k\%}$

patří mezi základní parametry transformátoru a jeho velikost lze určit výpočtem.

$$u_{k\%} = \frac{U_k}{U_{1n}} * 100$$

Velikost $u_{k\%}$

- * malé transformátory
- * střední transformátory (stovky kVA)
- * velké transformátory

2. Procentní impedance nakrátko - $z_{k\%}$

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}$$
$$Z_k = R_k + jX_k$$

Rozbor transformátoru nakrátko

3. Zkratový proud transformátoru - I_{zk}

velikost je dána zejména impedancí transformátoru Z_k .

Při výpočtu předpokládáme lineární závislost napětí a proudu (nedojde k nasycení obvodu).

1. způsob



2. způsob



I_{zk} je v rozsahu (10 – 20) násobek jmenovité proudu $\Rightarrow$ požadavek jištění.

K1

Rozbor transformátoru nakrátko

4. Účinník nakrátko - $\cos \varphi_k$

jeho velikost je dána zejména podílem činné a jalové složky impedance transformátoru Z_k . Zejména u velkých transformátorů je projevív vliv rozptylu.

Hodnota $\cos \varphi_k$ je značně rozdílná, pohybuje se v rozsahu 0,7 – 0,95

5. Ztráty nakrátko (ztráty ve vinutí) - $\Delta P_k = \Delta P_i$

jsou dány proudem a odporem vinutí.

Ztráty lze vyjádřit pomocí Jouleova zákona $\Rightarrow$

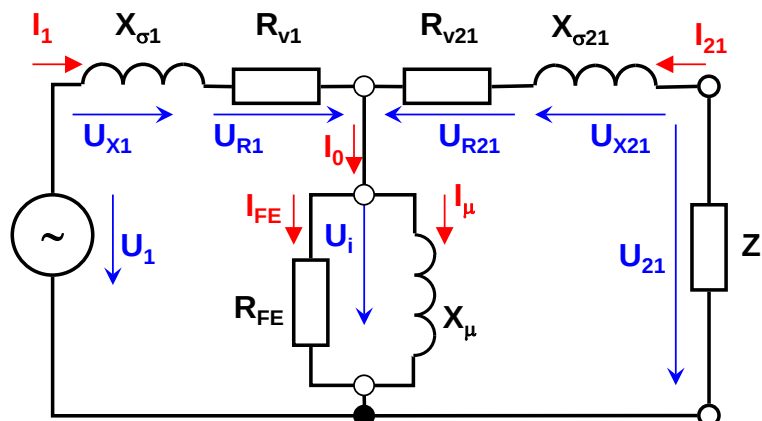
Pro transformátor platí:

pro jmenovitý proud:

Ztráty nakrátko lze určit měřením (wattmetr) nebo výpočtem

Pro porovnání ztrát $\Delta P_0 / \Delta P_k = 1 / (2,5 - 4)$

Transformátor při zatížení



V jakém rozsahu
lze měnit zatížení ?

$$U_{R21} = R_{v21} * I_{21},$$

$$U_{X21} = jX_{\sigma21} * I_{21}$$

$$U_i = U_{21} - (U_{R21} + jU_{X21})$$

$$I_{\mu} = U_i / jX_{\mu}$$

$$I_{FE} = U_i / R_{FE}$$

$$I_1 = (I_{FE} + jI_{\mu}) - I_{21}$$

$$U_{X1} = jX_{\sigma1} * I_1$$

$$U_{R1} = R_{v1} * I_1,$$

$$U_1 = U_i + (U_{R1} + jU_{X1})$$

Výpočet parametrů transformátoru

1. Příčné parametry - R_{FE}, X_{μ}

Vstupní hodnoty pro výpočet:

- a) výpočet účinníku naprázdno
- b) výpočet činné a jalové složky proudu
- c) výpočet příčných parametrů

Příklad:

Vypočítejte příčné parametry transformátoru s výkonem 500 VA, převodem 230/48 V, proudem naprázdno 7% a příkonem naprázdno 12 W

Výpočet parametrů transformátoru

2. Podélné parametry - R_k, X_k

Vstupní hodnoty pro výpočet:

- a) výpočet účinníku nakrátko



- b) výpočet impedance nakrátko



- c) výpočet podélných parametrů



Příklad:

Vypočítejte podélné parametry transformátoru s výkonem 500 VA, převodem 230/48 V, napětím nakrátko 8% a příkonem nakrátko 36 W

Výpočet transformátoru z náhradního schématu

Vstupní hodnoty pro výpočet:

1. Výpočet přepočteného výstupního napětí U_{21}



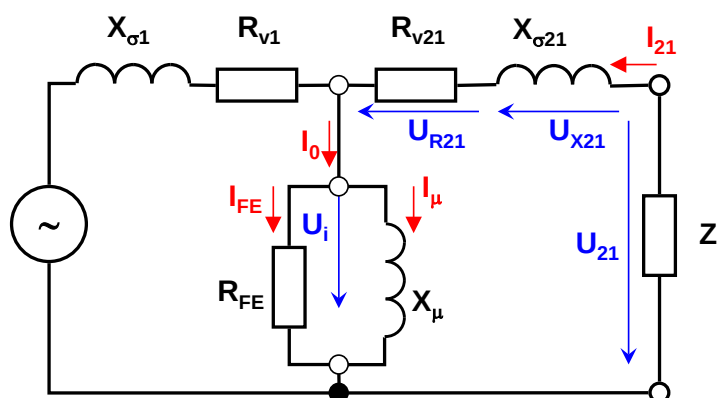
2. Výpočet přepočtené zátěže impedance Z_{21}



3. Výpočet výstupní proudu zátěže I_{21}



Do výpočtu se dosazuje proud I_{21} záporný (spotřebitelský systém) podle náhradního schématu



4. Výpočet úbytku napětí na výstupním vinutí – U_{v21}

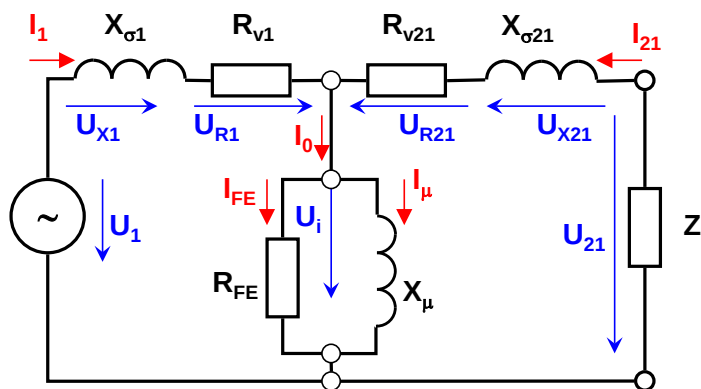


5. Výpočet indukovaného napětí U_i



6. Výpočet příčných proudů I_{μ} a I_{FE}





7. Výpočet vstupního proudu I_1 →

8. Výpočet úbytku napětí na vstupní straně U_{v1} →

9. Výpočet vstupního napětí U_1 →

10. Výpočet vstupního a výstupního výkonu S_1 a S_2 →

K1

Energetická bilance transformátoru

Ztráty, které závisí na zatížení

1. Ztráty ve vstupním vinutí
2. Ztráty ve výstupním vinutí

Ztráty, nezávislé na zatížení

3. Ztráty v železe

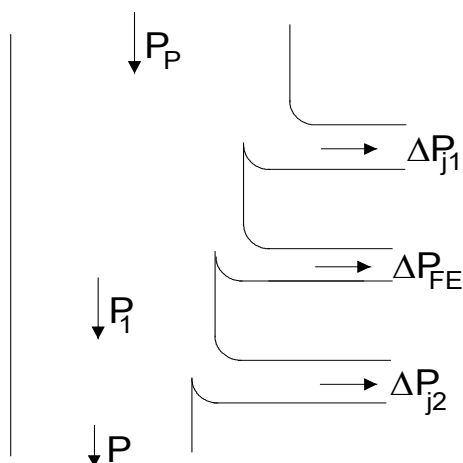


Diagram přeměny činného výkonu

- P_p – příkon odebíraný ze sítě
- P_1 – výkon procházející vzduchovou mezerou
- P – výkon dodaný do sítě

Energetická bilance transformátoru

Účinnost se mění se zatížením a s účínkem

Účinnost transformátoru:
pro $\cos \varphi \cong 1$ platí

Jako štítková hodnota se udává zdánlivý jmenovitý výkon transformátoru.

$$\eta = \frac{S_n \cdot \cos \varphi}{S_n \cdot \cos \varphi + \Delta P_0 + \Delta P_K} * 100$$

Výkon transformátoru se mění lineárně se zatížením proto zavádíme tzv. zatěžovatel - i

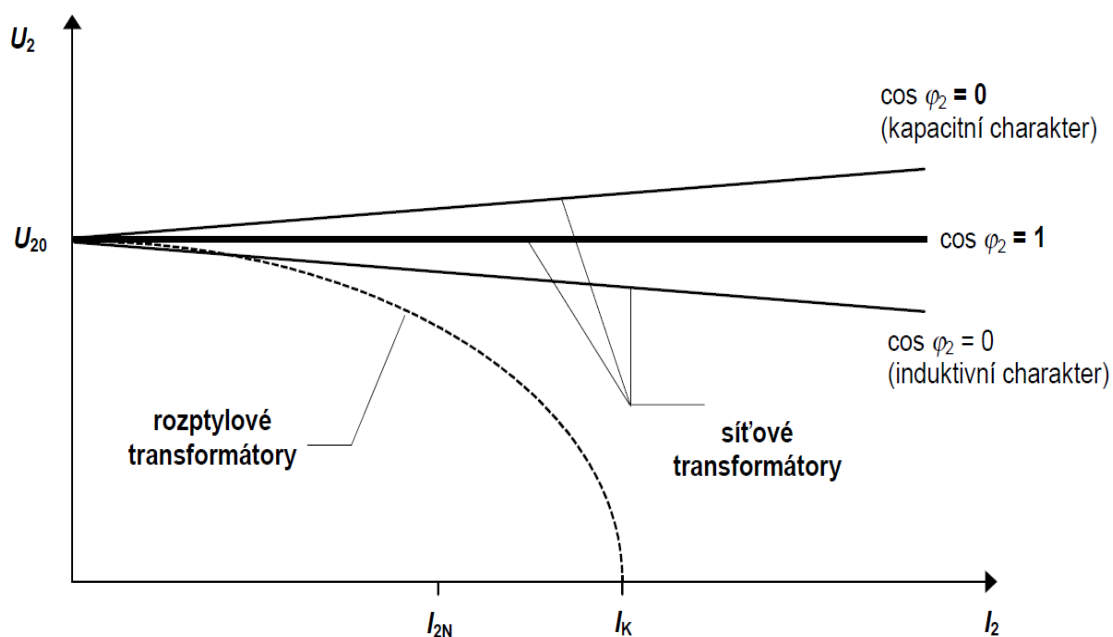
$$i = \frac{I}{I_n} = \frac{S}{S_n}$$

Vyjádření ztrát
jednofázového
transformátoru pro vstupní
proud I_1

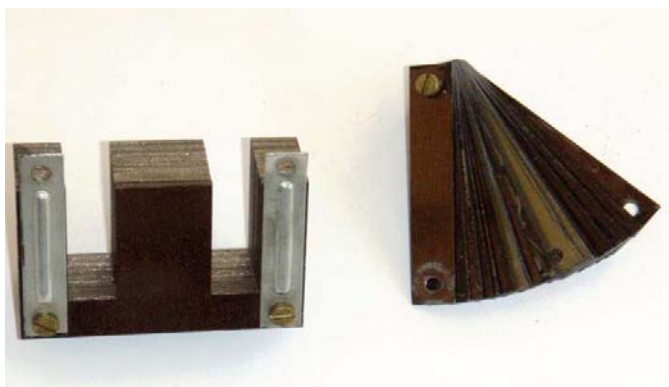
$$\eta = \frac{S_n \cdot i \cdot \cos \varphi}{S_n \cdot i \cdot \cos \varphi + \Delta P_0 + \Delta P_K \cdot i^2} * 100$$

Účinnost se pohybuje v rozsahu od 70% (malé transformátory) do 99% (velké transformátory).

Zatěžovací charakteristiky



Typy jader transformátorů



- EI jádra

- M jádra



Typy jader transformátorů

- Toroidní jádra



- Stupňovitá dělená jádra



- Jádra UNICORE





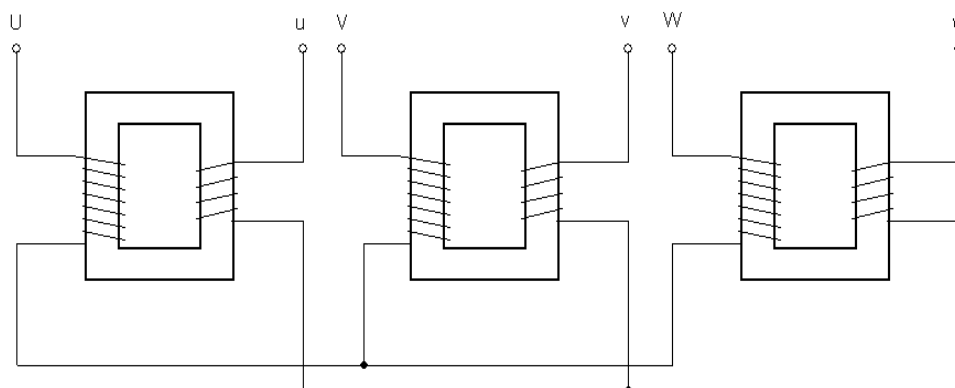
Provedení trojfázového transformátoru

1. Tři jednofázové transformátory

Výhoda: nezávislý magnetický systém, jednodušší doprava

Nevýhoda: velká spotřeba materiálu, cena

Použití: transformátory největších výkonů



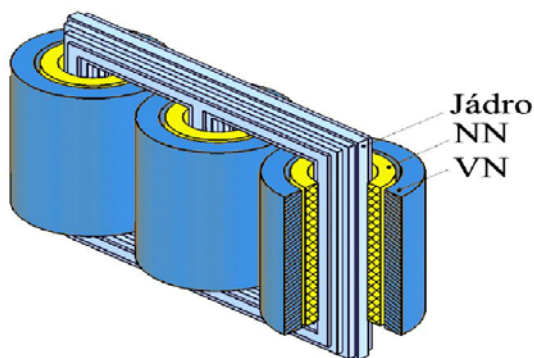
Provedení trojfázového transformátoru

2. Trojfázový transformátor

Výhoda: menší celková hmotnost, nižší cena

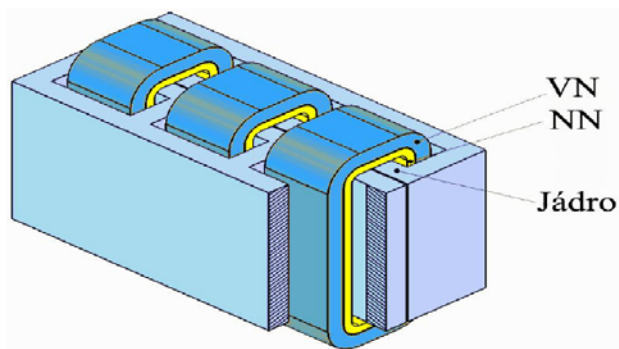
Nevýhoda: nesymetrie v magnetickém obvodu, transformátory největších výkonů - doprava

Použití: běžné trojfázové transformátory



Jádrový

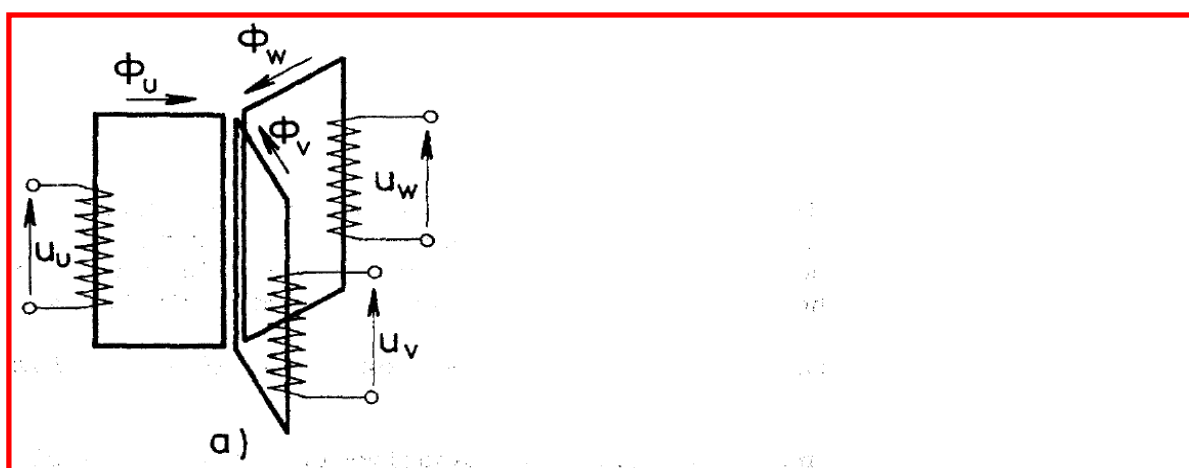
na každém sloupku je vinutí



Plášťový

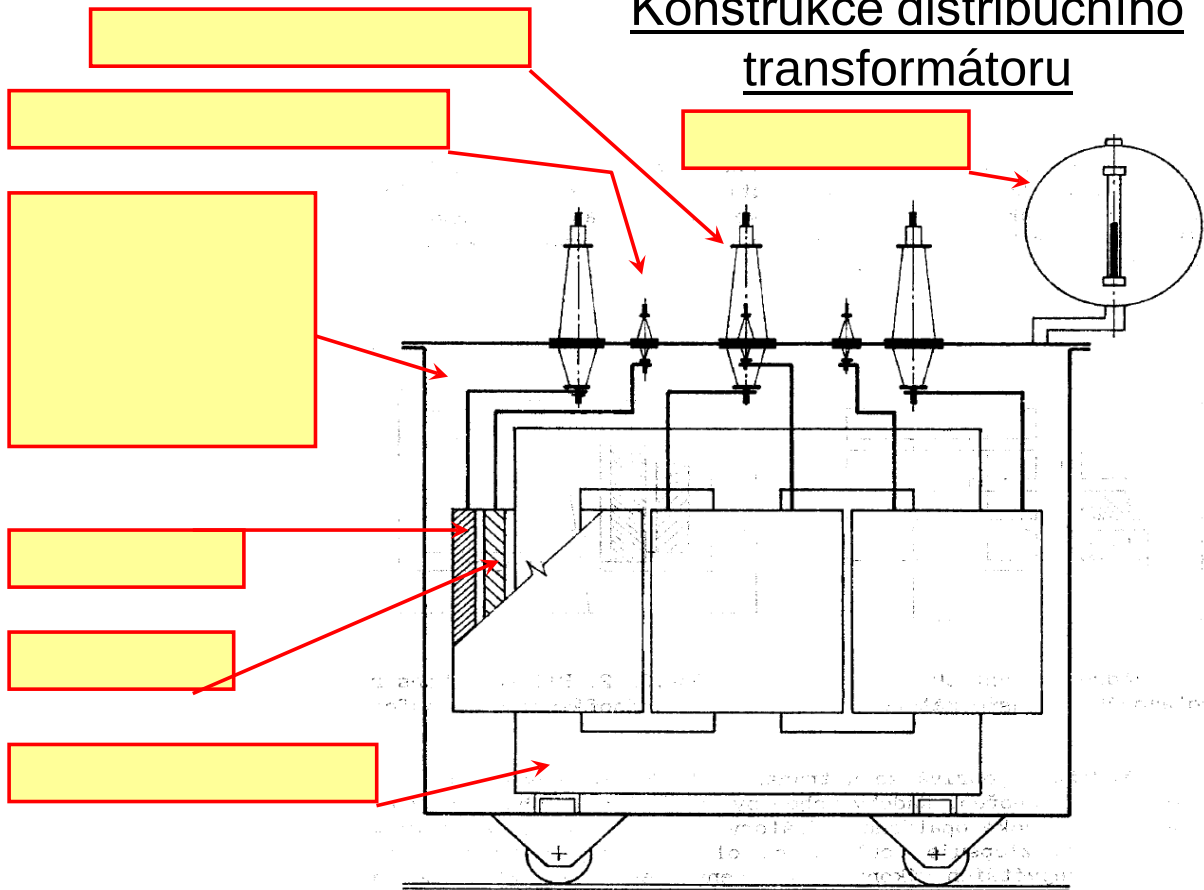
krajní sloupky jsou bez vinutí

Vytvoření jádrového magnetického obvodu trojfázového transformátoru

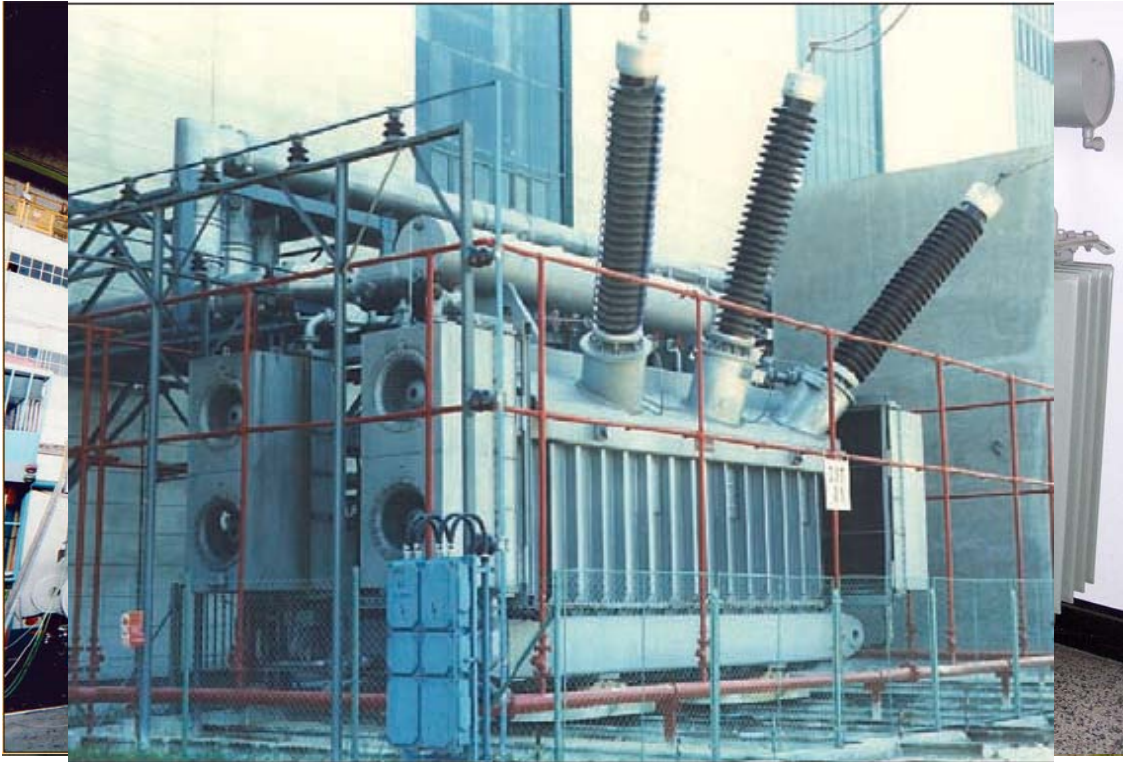


3 samostatné transformátory, součet okamžitých hodnot toků na prostředním sloupku je nulový $\Rightarrow$

Konstrukce distribučního transformátoru



Ukázky trojfázových transformátorů



Chlazení transformátoru

- **VZDUCHOVÉ**
 - Odvod tepla konvekcí (prouděním)
 - Přirozená nebo nucená konvekce
 - Menší výkony, větší plocha chlazení – větší objem
- **KŘEMIČITÝ PÍSEK**
 - Odvod tepla kondukcí (vedením)
 - Místa s neb. výbuchu a požáru – doly, obch. domy, lodě
 - Značná hmotnost, lze dopravovat v jakékoliv poloze

Suché distribuční transformátory s litou izolací



Technická data:

Normy: ČSN EN 60076, IEC 60076, CEI 14-8

Jmenovité napětí VN: 6, 10, 12, 22, 35 kV

Odbočky: $\pm 2 \times 2,5 \%$

Jmenovité napětí NN: 0,400; 0,415; 0,420 kV

Kmitočet: 50 / 60 Hz

Druh spojení: Yzn1, Dyn1 (standardní)

Třída izolace: F (155 °C)

Chlazení: **AN (přirozené vzduchové)**

Vinutí: Al nebo Cu, možnost vývodů NN dolů nebo do stran

Stupeň krytí: IP 00 (IP 20, IP 23 a IP 31),
vnitřní i venkovní provedení

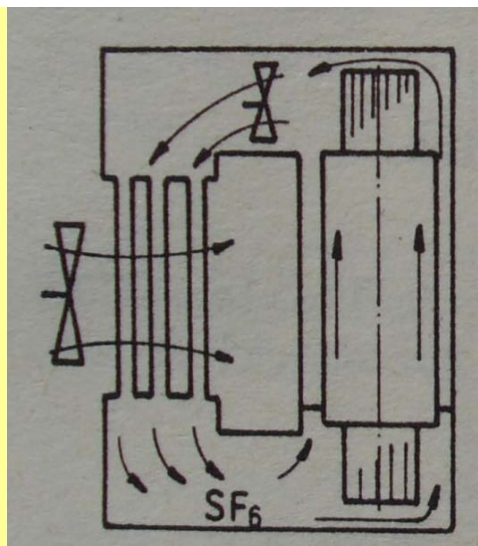
Standardní příslušenství: Štítek, uzemňovací svorka, závěsná oka, zemnicí vývod, oboustranný podvozek, teplotní čidla

25kVA , 6÷22kV, $u_k=6\%$, $P_0=240W$, $P_k=750W$, 1200 x 620 x 1100mm, 520kg

Chlazení transformátoru

• PLYNEM

- Nejčastěji SF_6
 - netečný plyn bez zápachu
 - 3x větší tepelná vodivost než vzduch
 - lepší elektroizolační vlastnosti
- Vhodné pro omezené prostory (lodě, lokomotivy, doly)



Chlazení transformátoru

- OLEJEM — minerálním nebo syntetickým
 - MINERÁLNÍ
 - El. oblouk → hořlavé plyny + vzduch → výb.směs!
 - Je hygroskopický (už 0,01% H₂O snižuje E_p o 20%)
 - Kaly → zhoršuje se tepelná vodivost
 - SYNTETICKÉ
 - Pro vysoká napětí a velké výkony
 - Nehořlavé, nehgroskopické
 - Dříve PCB (polychlorované bifenyly) – vysoce tox.!

K1

Olejové distribuční transformátory hermeticky uzavřené, nebo s konzervátorem



Technická data:

Jmenovité napětí VN: 6 - 24 kV

Odbočky: ± 2 x 2,5 %

Jmenovité napětí NN: 0,400; 0,415; 0,420 kV

Kmitočet: 50 / 60 Hz

Vinutí: Cu

Druh spojení: Yzn1, Dyn1 (standardní)

Chlazení: **ONAN, pro vnitřní i venkovní instalaci, s náplní minerálního oleje**

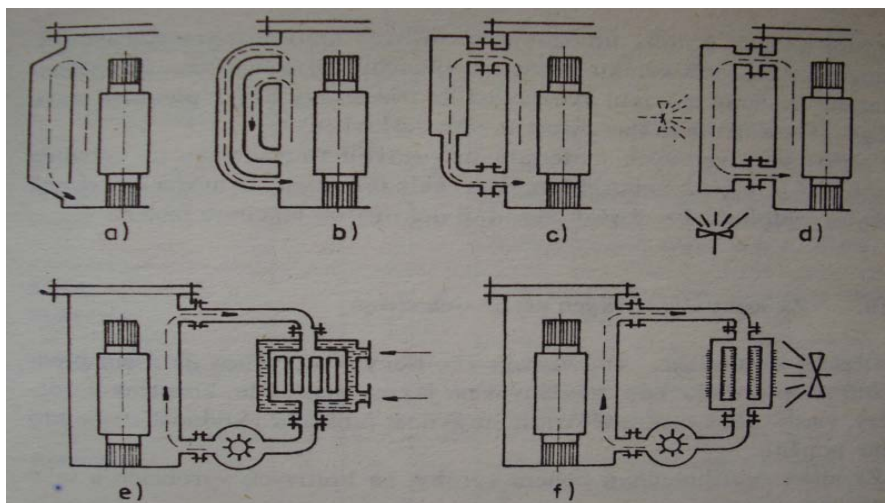
Nádoba vyrobena z ocel. plechu s vnitřním a vnějším speciálním antikoročním nátěrem

Standardní příslušenství: Štítek, uzemňovací svorka, závěsná oka, obousměrný podvozek.

Sn=25kVA , U_{1n}= 6÷24kV, u_k=4%, P₀=150W, P_k=700W,

Rozměry - 780 x 460 x 1120mm, olejová náplň 70kg, celkem 320kg

Chlazení transformátoru



a) přirozené , b) přirozené s trubkami, c) přirozené s radiátory, d) přirozené s radiátory ofukovanými vzduchem, e) nucené s výměníkem chlazeným vodou, f) nucené s výměníkem chlazeným vzduchem

Značky pro chladicí médium

Druh chladicího média	Značka
vzduch	A
plyn	G
voda	W
olej (bod vzplanutí $\leq 300\text{ }^{\circ}\text{C}$)	O
jiná kapalina (bod vzplanutí $> 300\text{ }^{\circ}\text{C}$)	K
jiná kapalina (neměřitelný bod vzplanutí)	L

Značky pro způsob cirkulace .

Způsob cirkulace	Značka
přirozená	N
nucená (ventilátor nebo čerpadlo)	F
nucená s usměrněným prouděním	D

- AN – transformátor s přirozeným chlazením.

- AF – transformátor s ochlazováním vzduchu pomocí ventilátoru, který běží trvale.

- AN/AF – transformátor s přirozeným chlazením a s pomocným ventilátorem, který se zapíná pouze při přetížení.

- AFWF – transformátor se skříní a s tepelným výměníkem vzduch/voda. Chladicí vzduch cirkuluje uvnitř skříně pomocí ventilátoru a přitom prochází přes výměník tepla. Ve výměníku se teplým vzduchem ohřívá voda, která odvádí teplo.

- ONAN – transformátor s olejovým chlazením v uzavřené nádobě, která je ochlazovaná vzduchem.

- ONAF – transformátor s olejovým chlazením v uzavřené nádobě, která je ochlazovaná vzduchem za pomoci ventilátoru.

ONAN/ONAF – transformátor s olejovým chlazením v uzavřené nádobě, která je ochlazovaná vzduchem za pomoci ventilátoru. Ventilátor se zapíná pouze při zatížení.

- OFWF – transformátor s olejovým chlazením v uzavřené nádobě. Olej cirkuluje za pomoci čerpadla a přitom prochází přes výměník tepla. Ve výměníku se teplým olejem ohřívá voda, která odvádí teplo. Cirkulace vody je také pomocí čerpadla

Zapojení trojfázového transformátoru

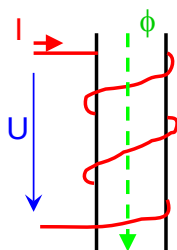
Možnosti zapojení vinutí:

- a) podle směru navíjení cívky
- pravotočivé
 - levotočivé

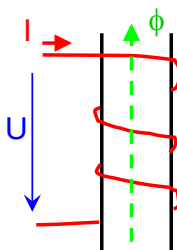
Pro pravotočivou cívku se směr indukovaného napětí shoduje se směrem magnetického toku.

Při rozboru transformátoru předpokládáme vždy pravotočivé vinutí. Je-li vinutí levotočivé, ve schématu se zamění vstupní a výstupní svorky.

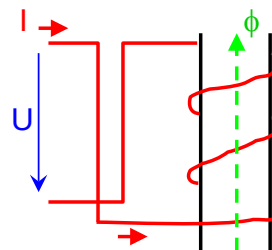
pravotočivá
cívka



levotočivá
cívka



pravotočivá cívka se
změnou vstupních svorek



Zapojení trojfázového transformátoru

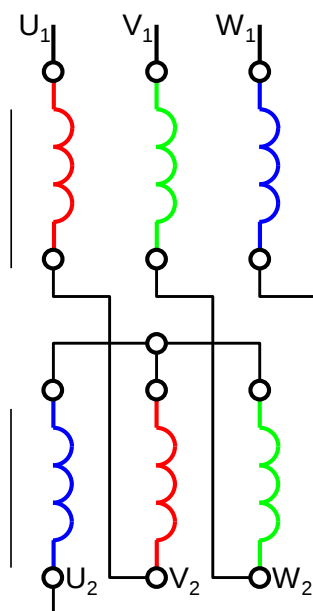
b) podle zapojení konců vinutí

	vyšší napětí	nižší napětí
- trojúhelník	D	d
- hvězda	Y	y
- střední vodič	N	n

zapojení do
hvězdy

zapojení do trojúhelníku (2
možnosti)

Zapojení trojfázového transformátoru



b) podle zapojení konců vinutí

	vyšší napětí	nižší napětí
- lomená hvězda		Z
(Lomená hvězda se používá pouze na straně nn)		

Hodinový úhel

Hodinový úhel vyjadřuje fázový posun mezi fázory vstupního a výstupního napětí stejné fáze

udává se v hodinách, jedna hodina je 30°

Předpoklad:

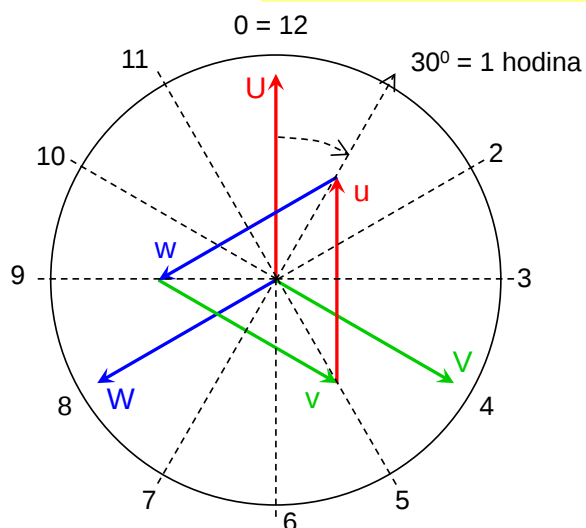
Vstupní strana – hvězda
Výstupní strana – trojúhelník

Obě vinutí jsou pravotočivé $\Rightarrow$
fázory napětí na jednom sloupku
musí mít stejný směr

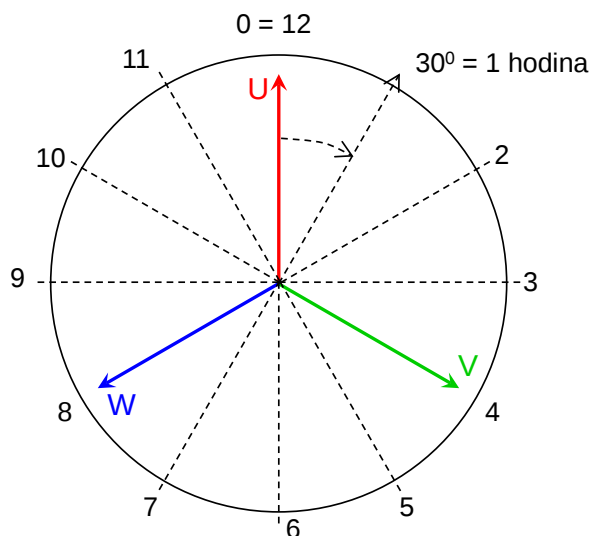
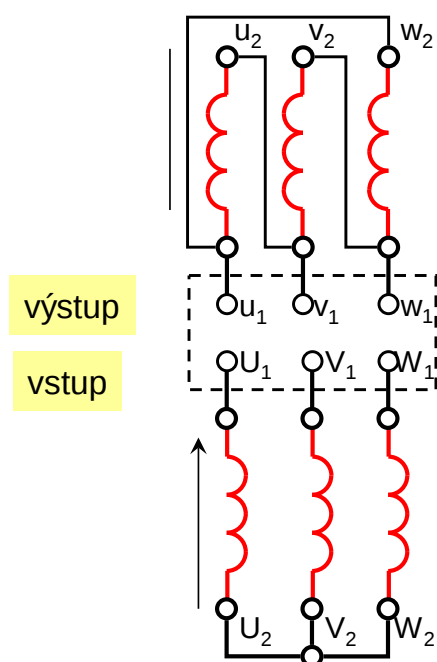
Pro určení hodinového úhlu musíme porovnávat stejné fáze a stejnou hodnotu napětí (fázové nebo sdružené).

V tomto případě porovnáваме fázor fázového napětí první fáze

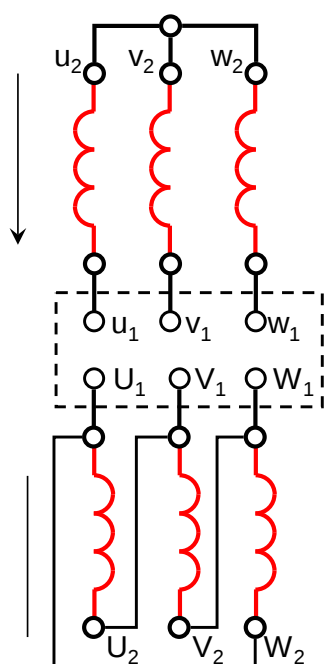
Dané zapojení



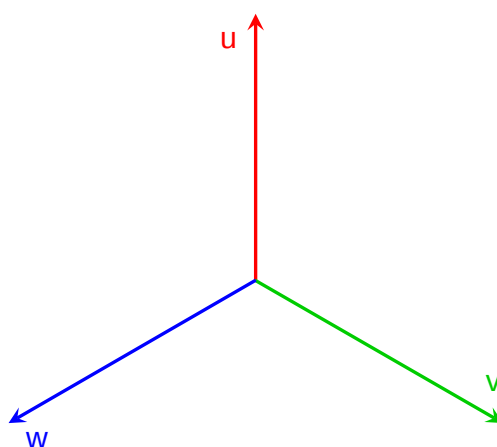
Zapojení vinutí Yd1



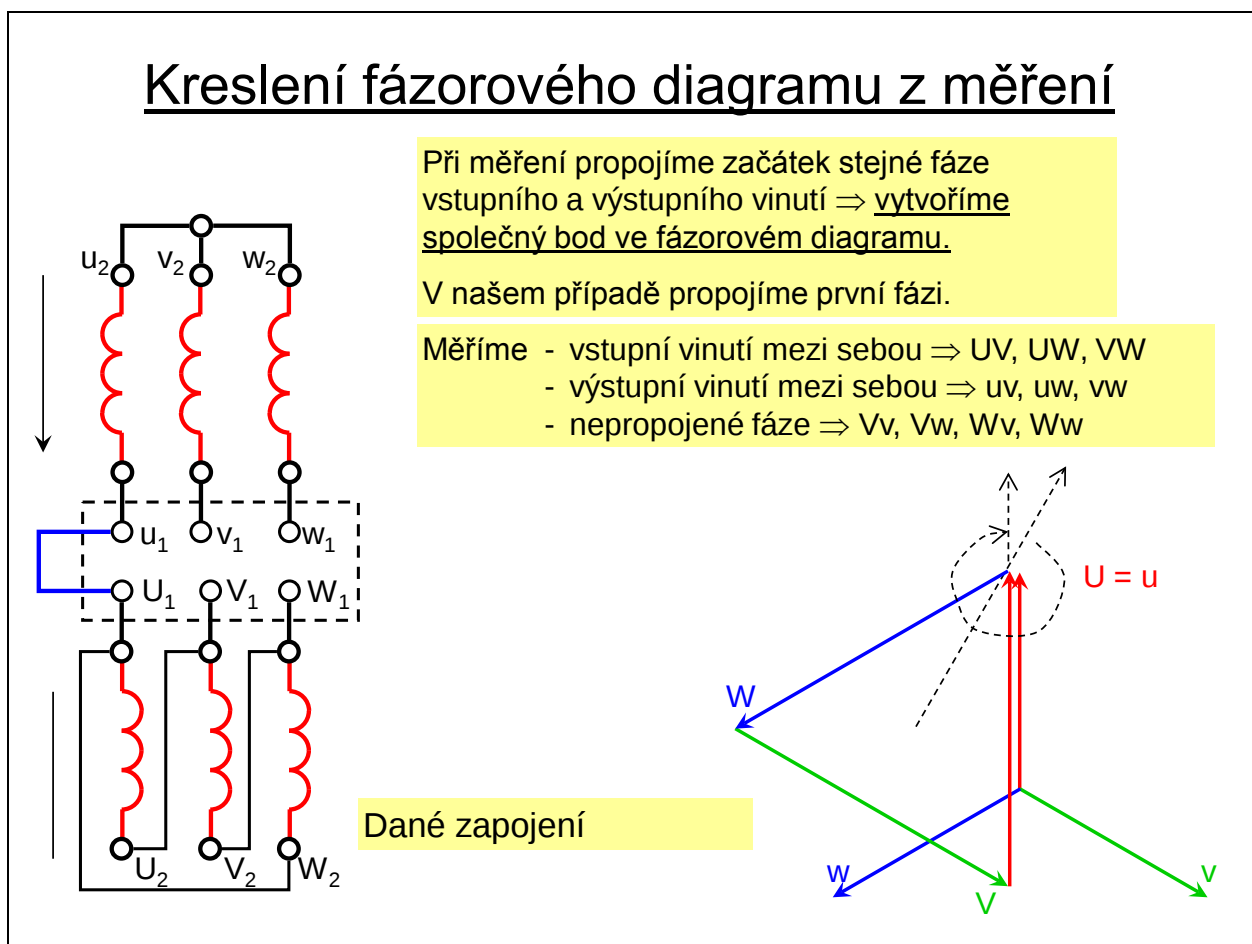
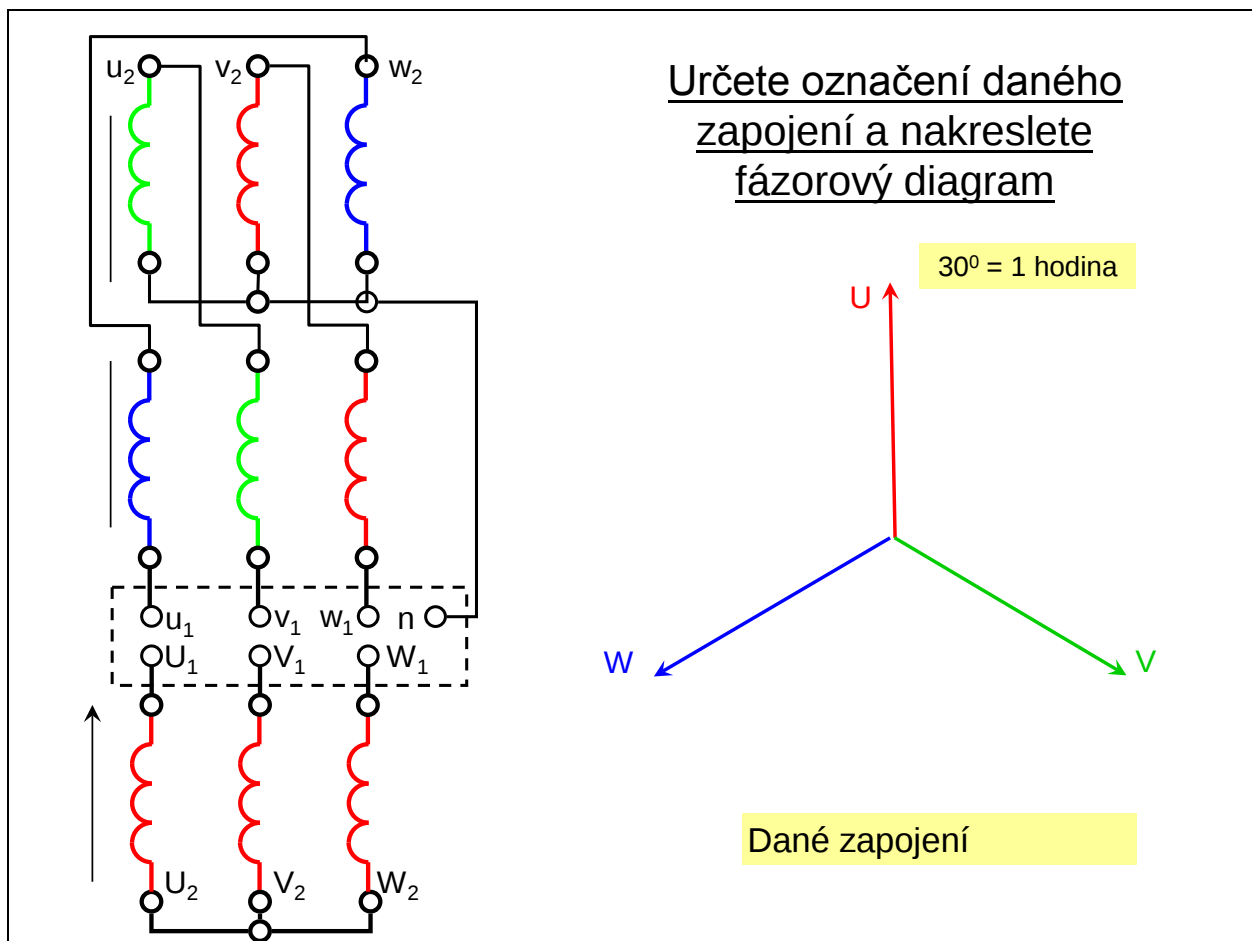
Určete označení daného zapojení a nakreslete fázorový diagram



330° = 11 hodin

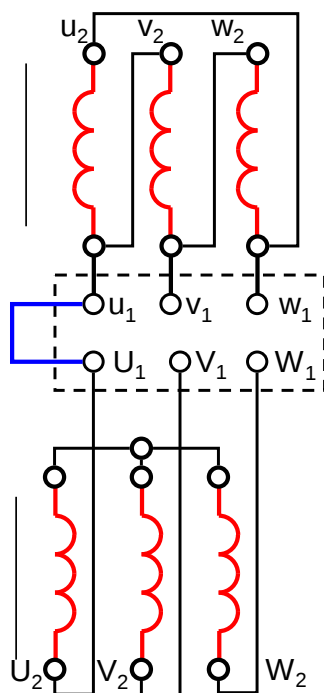


Dané zapojení

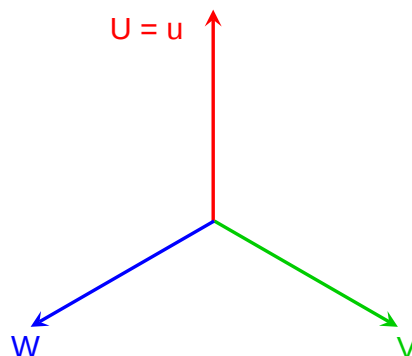


Určete zapojení

Dané zapojení :

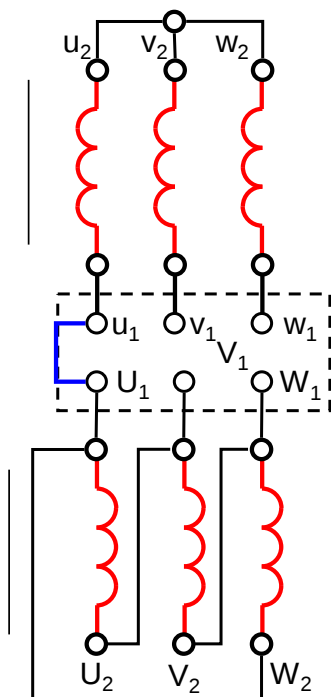


naměřené hodnoty (V)	
vstup	70
výstup	42
Vv	108
Vw	108
Wv	82
Ww	108



Určete zapojení

Dané zapojení :



naměřené hodnoty (V)	
vstup	62
výstup	107
Vv	62
Vw	62
Wv	123
Ww	62

Přehled používaných zapojení

Používaná spojení:

- Yy souměrná zatížení, malé a střední výkony (jádrový typ)
- Ydyn souměrná zatížení, malé a střední výkony (plášťový typ)
- Yzn distribuční transformátory malých výkonů (do 250 kVA včetně)
- Dyn distribuční transformátory velkých výkonů (od 400 kVA včetně)
- Yd1 blokové transformátory v elektrárnách (spojení do trojúhelníku je na straně alternátoru)

Vliv konfázních magnetických toků při nesouměrném zatížení na výstupu transformátoru lze odstranit nebo omezit:

- Užitím terciárního vinutí spojeného do trojúhelníku
- Spojením vstupu do trojúhelníku
- Spojením výstupu do lomené hvězdy

Provozní stavy transformátoru

Provozní stavy jsou stejné jako u jednofázových transformátorů



Výpočet trojfázového transformátoru

Princip výpočtu je stejný jako u jednofázového transformátoru

Pozor na trojfázové vyjádření:

kde I je průměrná hodnota proudů I_1 , I_2 a I_3

Fázorové diagramy se kreslí jednofázově, simulace se provádějí jednopólově.

Výpočet trojfázového transformátoru

Příklad:

Vypočítejte příčné a podélné parametry trojfázového transformátoru s výkonem 1000 VA, převodem 400/48 V, proudem naprázdno 3%, napětím nakrátko 8%, výkonem naprázdno 7,5 W a výkonem nakrátko 68 W.

naprázdno	
I_n (A)	1,445
$\cos \varphi$	0,25
I_{c} (A)	0,0108
I_j (A)	0,0333
R_{FE} (Ω)	21 296
X_m (Ω)	6 907

nakrátko	
I_n (A)	1,445
$\cos \varphi$	0,85
Z (Ω)	12,73
R_k (Ω)	10,82
X_k (Ω)	6,706

Paralelní chod transformátorů

Paralelní chod:

na vstupní straně je společná síť a na výstupní straně je společná přípojnice

Význam:

- * při malém odběru možnost odpojení jednoho transformátoru
⇒ ekonomický provoz
- * vyšší spolehlivost napájení (porucha, revize, ...)

Nevýhody:

- * vyšší cena skupiny (dvou nebo více) transformátorů
- * výrazné zhoršení zkratových poměrů (paralelní zapojení impedance ⇒ zvýšení zkratového proudu)

Podmínky pro paralelní chod:

1. stejný převod transformátorů naprázdno
2. stejný hodinový úhel
3. přibližně stejné napětí nakrátko

Paralelní chod transformátorů

Stejný převod transformátoru:

- * při nestejném převodu je na výstupní straně různé napětí a vzniká vyrovnávací proud
- * maximální dovolená odchylka je $\pm 0,5\%$ $\Rightarrow$ vyrovnávací proud je $I_v = (5-10)\% I_n$.

Stejný hodinový úhel:

- * při nestejném hodinovém úhlu je na výstupní různý fázový posun napětí a vzniká vyrovnávací proud
- * při rozdílu 1 hodina vzniká vyrovnávací proud $I_v = 25\% I_{kn}$
 $\Rightarrow$ transformátory musí mít stejný hodinový úhel

Přibližně stejné napětí nakrátko:

- * transformátory musí mít na vstupu a výstupu stejné napětí $\Rightarrow$ mají stejný úbytek napětí
- * $\Delta U_A = \Delta U_B \Rightarrow I_A * Z_A = I_B * Z_B$
- * transformátor s nižší impedancí převezme vyšší výkon
- * dovolená tolerance je 10%

Rozložení zatížení při paralelním chodu

Výstupní napětí na obou transformátorech musí být stejná: $U_a = U_B$

Úbytky na transformátorech musí být stejné: $I_A * Z_A = I_B * Z_B$

$$Z_A = \frac{U_{kA}}{I_{nA}}$$

$$u_{kA} = \frac{U_{kA}}{U_2} \Rightarrow U_{kA} = U_2 * u_{kA}$$

$$Z_A = \frac{U_2 * u_{kA}}{I_{nA}}$$

podobně $\rightarrow$

$$Z_B = \frac{U_2 * u_{kB}}{I_{nB}}$$

po dosazení

$$I_A * \frac{U_2 * u_{kA}}{I_{nA}} = I_B * \frac{U_2 * u_{kB}}{I_{nB}}$$

Jmenovatel lze rozšířit o napětí ($S_n = U * I_n$) $\rightarrow$

$$\frac{S_A}{S_{nA}} * u_{kA} = \frac{S_B}{S_{nB}} * u_{kB}$$

1. Stejná napětí nakrátko ($u_{kA}=u_{kB}$) a různé jmenovité výkony ($S_{nA} \neq S_{nB}$)

$$\frac{S_A}{S_B} = \frac{S_{nA}}{S_{nB}}$$

$$\frac{S_A}{S_{nA}} = \frac{S - S_A}{S_{nB}} \Rightarrow$$

Celkové zatížení se rozdělí v poměru jmenovitých výkonů

2. Stejná jmenovité výkony ($S_{nA}=S_{nB}$) a různá napětí nakrátko ($u_{kA} \neq u_{kB}$)

$$\frac{S_A}{S_B} = \frac{u_{kB}}{u_{kA}}$$

$$S_A * u_{kA} = (S - S_A) * u_{kB} \Rightarrow$$

Celkové zatížení se rozdělí v obráceném poměru jejich napětí nakrátko

Příklady

Vypočítejte rozložení výkonů mezi dva transformátory:

a) $u_{kA} = u_{kB} = 6\%$, $S_{nA} = 1000\text{kVA}$, $S_{nB} = 630\text{ kVA}$, $S = 1450\text{kVA}$

b) $u_{kA} = 6,2\%$, $u_{kB} = 5,8\%$, $S_{nA} = S_{nB} = 1000\text{kVA}$, $S = 1900\text{kVA}$

Ztráty při paralelní spolupráci

Obecný vztah pro výpočet ztrát:

$$\Delta P = \Delta P_0 + i^2 * \Delta P_k \quad \text{kde zatěžovatel } i = S/S_n$$

Jestliže pracuje pouze transformátor A, pak jsou celkové ztráty:

$$\Delta P_A = \Delta P_{0A} + i_A^2 * \Delta P_{kA}$$

Jestliže pracují transformátor A + B (oba shodné), pak jsou celkové ztráty:

$$\Delta P = 2 * \Delta P_{0A} + 2 * (i_A/2)^2 * \Delta P_{kA}$$

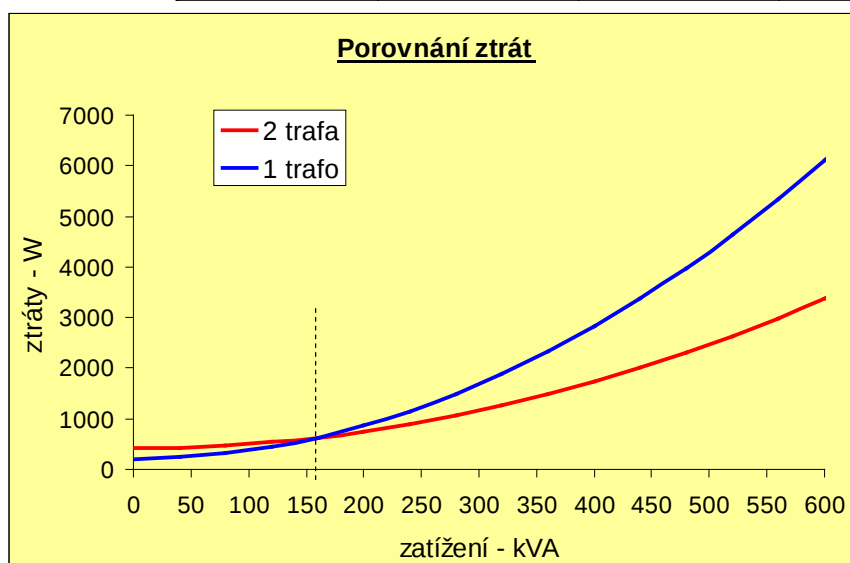
Při jaké zátěži jsou ztráty stejné (kdy je vhodné z pohledu ztrát odpojit jeden transformátor) ?

Předpoklad – oba transformátory mají stejné parametry

$$\Delta P_A = \Delta P \Rightarrow \Delta P_0 + i^2 * \Delta P_k = 2 * \Delta P_0 + 2 * (i/2)^2 * \Delta P_k$$

Porovnání ztrát na 2 transformátorech

Amorfní distribuční transformátor			
S_n (kVA)	U (kV)	ΔP_0 (W)	ΔP_k (W)
630	22/0,42	210	6 500



ověřte
výpočtem



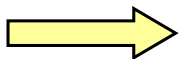
Regulace napětí

V praxi požadujeme konstantní hodnotu výstupního napětí podle určení spotřebitele.

Základní rozdělení:

- | | |
|----------------------------|---|
| a) podle principu regulace | - změna počtu závitů na vstupní straně |
| | - změna počtu závitů na výstupní straně |
| b) podle způsobu regulace | - regulace naprázdno |
| | - regulace při zatížení |
| c) podle plynulosti změny | - skoková regulace |
| | - plynulá regulace |

Princip regulace:



$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow U_2 = U_1 * \frac{N_2}{N_1}$$

Změna počtu závitů na vstupní straně

- ☺ jemná regulace
- ☺ menší přepínací proudy
- ☹ změna magnetického toku (změna počtu závitů na vstupní straně) $\Rightarrow$ horší využití magnetického obvodu

Změna počtu závitů na výstupní straně

- ☹ hrubá regulace
- ☹ větší přepínací proudy
- ☺ magnetický obvod je plně využit

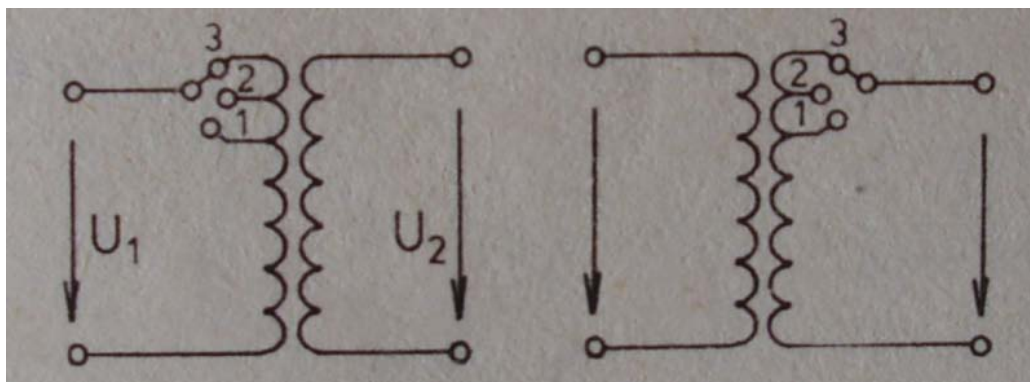
Skokové amplitudové řízení

Změna počtu závitů na vstupní straně

- ☺ jemná regulace
- ☺ menší přepínací proudy
- ☹ změna magnetického toku (změna počtu závitů na vstupní straně) $\Rightarrow$ horší využití magnetického obvodu

Změna počtu závitů na výstupní straně

- ☹ hrubá regulace
- ☹ větší přepínací proudy
- ☺ magnetický obvod je plně využit



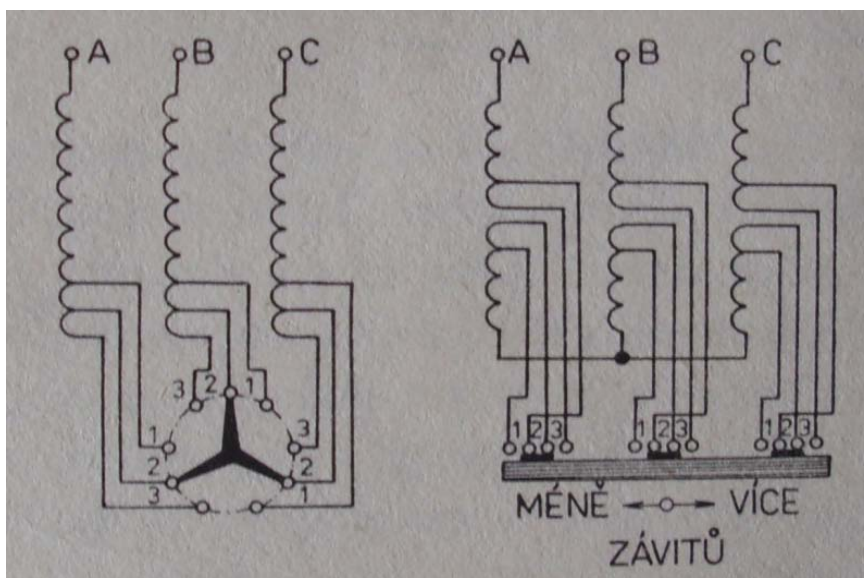
Zmenšováním počtu závitů na vstupní straně se výstupní napětí :

Zmenšováním počtu závitů na výstupní straně se výstupní napětí :

Skokové amplitudové řízení

Způsoby zapojení přepojovačů

- Přepínač v uzlu vinutí – přepojovač tvoří uzel vinutí. Při zkratu se zvětšuje namáhání vinutí (elektrodynamické síly)
- Přepínač ve středu vinutí – výhodnější (menší namáhání)



Možnosti a provedení regulace

Nejčastěji se provádí regulace na vstupní straně transformátoru

Regulace distribučních transformátorů:

- je skoková a provádí se ve vypnutém stavu zpravidla podle rozvodu za transformátorem a místních podmínek
- rozsah regulace je $\pm 2 \times 2,5 \%$ (celkem 5 výstupních hodnot) nebo $\pm 5 \%$ (3 výstupní hodnoty)

Regulace přenosových transformátorů

- je plynulá nebo skoková a provádí se **za provozu** podle zatížení sítě
- přepínají se konce vinutí (jednodušší) nebo výstupy ze středu vinutí (technicky výhodnější)

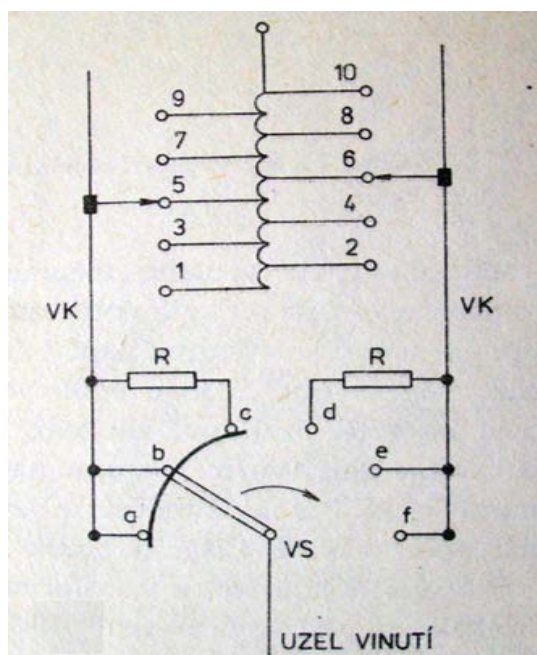
Příklady: Transformátor 16 MVA, $35 \pm 8 \times 2\%$ / 6,3 kV
Olejový transformátor 150 MVA, $220 \pm 8 \times 1,25\%$ / 145 / 12 kV

K1

Skokové amplitudové řízení

Přepínání při zatížení bez přerušení proudového obvodu

Přepínač může být na začátku, ve středu nebo v uzlu vinutí



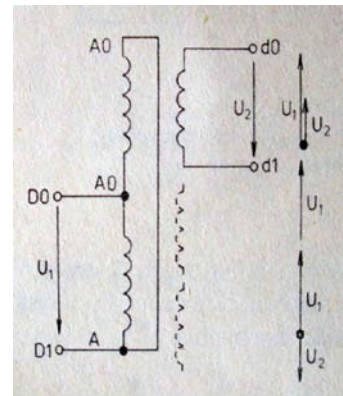
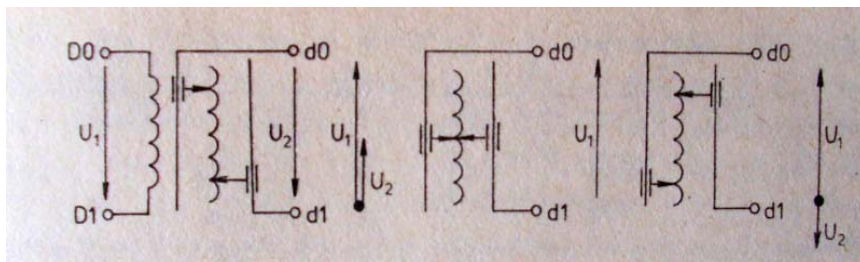
- VS – momentový výkonový přepínač
- VK – volič
- R – omezovací rezistor

Plynulé amplitudové řízení

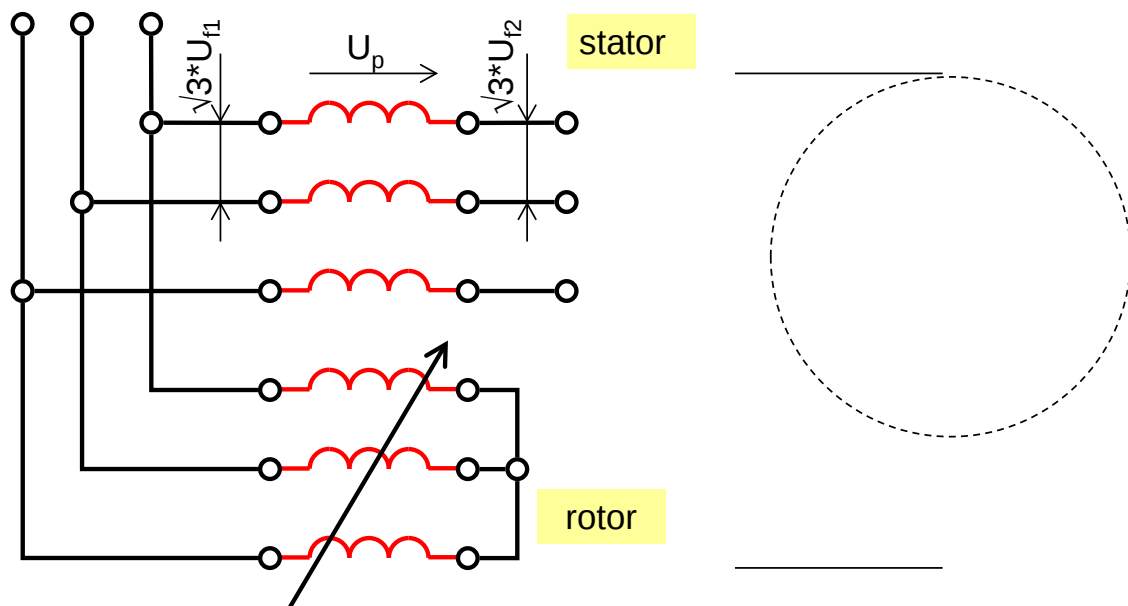
Vyžaduje se plynulá a častá změna výstupního napětí při zatížení

Lze uskutečnit:

- a) Sběrači které kloužou po odizolovaných závitech vinutí
- b) Pohyblivým výstupním vinutím
- c) Předmagnetizací magnetického obvodu stejnosměrným proudem
- d) Vzájemným natáčením cívek (natáčivý transformátor)



Jednoduchý natáčivý transformátor



Natáčivý transformátor je zabrzděný kroužkový motor (asynchronní motor s vinutým rotorem). Rotor lze natáčet samosvorným šroubovým převodem (nesmí se sám roztočit). Přívod na rotorové vinutí je ohebnými vodiči.

Jednoduchý natáčivý transformátor

Princip:

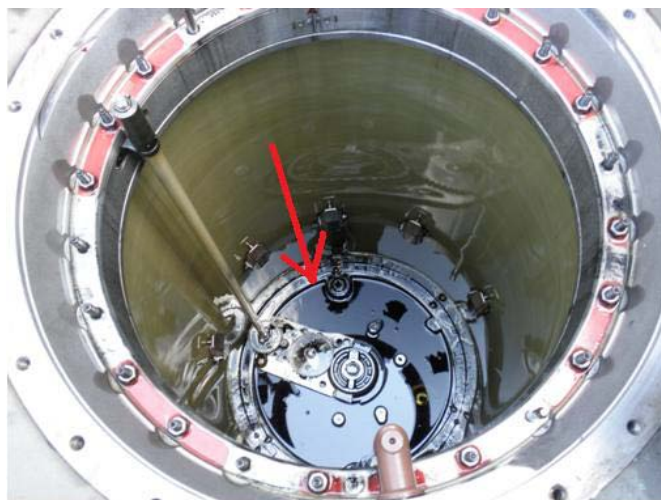
1. Na vinutí statoru je přivedeno síťové napětí
2. Zároveň se na vinutí statoru indukuje napětí z rotorového vinutí. Natáčení rotoru se mění fázový posun mezi fázory napětí statoru a indukovaného napětí rotoru
3. Výslední napětí je dáno fázorovým součtem obou napětí

Rozsah regulace je dán poměrem počtu závitů statoru a rotoru a koncovými mechanickými zarážkami.

Chlazení je ventilátorem.

V současné době se natáčivý transformátor nahrazuje regulačním autotransformátorem.

Vytažení přepínače z válce a pohled do válce s nečistotou vzniklou regulováním na dně

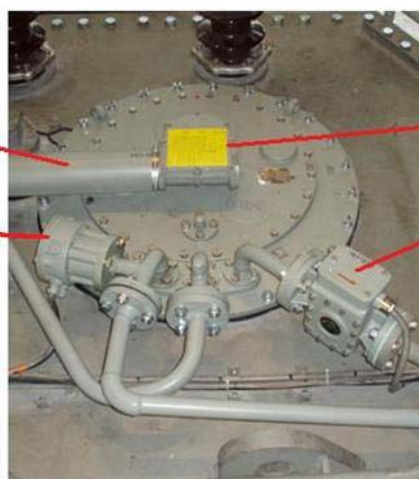


Náhled do motorového pohonu k této regulaci a pohled na víko přepínače po revizi



Hnací hřídel
pod krytem

Výbušná
membrána



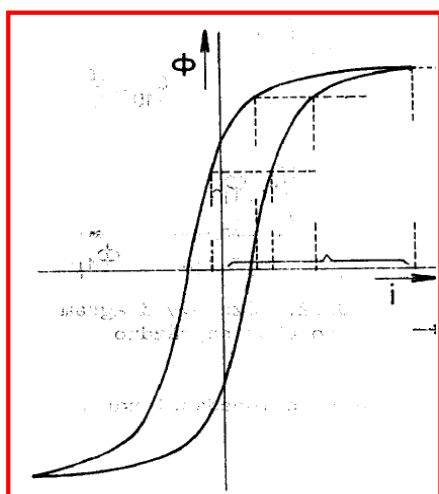
Převodový
domeček

Ochranné relé

Magnetizační proud

je proud potřebný k vytvoření a udržení magnetického pole

Průběh magnetizačního proudu je dán hysterézní smyčkou $\Rightarrow$ nemá sinusový průběh (při napájení transformátoru z napěťového zdroje)



Čím je dán tvar hysterézní smyčky

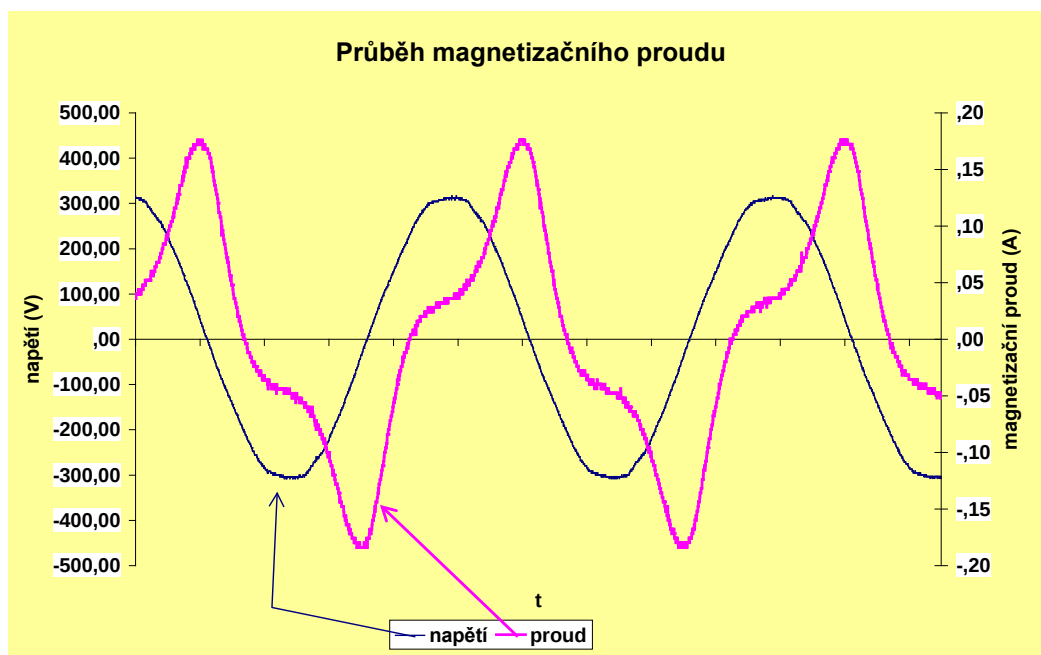
materiálem a technologií výroby (plechy válcované za tepla, za studena, amorfni)

Průběh magnetizačního proudu lze rozložit na vyšší harmonické (1, 2, 3, ...)

Čím se liší jednotlivé harmonické

Jednotlivé harmonické se liší amplitudou a frekvencí (např. 3 harmonická kmitá s trojnásobnou frekvencí)

Magnetizační proud



U magnetizačního proudu se na deformaci nejvíce projevuje 3. harmonická, která má až 50% amplitudy 1. harmonické. Účinek vyšších harmonických je nežádoucí a lze je omezit zapojením vinutí do trojúhelníka.

K1

Přechodové jevy - připojení transformátoru naprázdno na síť

Při připojení transformátoru na síť vzniká přechodový děj, který má za následek nárůst proudu $\Rightarrow$ vliv na jištění.

Předpoklady:

- * transformátor je v okamžiku připojení naprázdno
- * proud naprázdno má čistě indukční charakter ($I_0 = I_\mu$, $I_{Fe} = 0$)

Připomenutí:

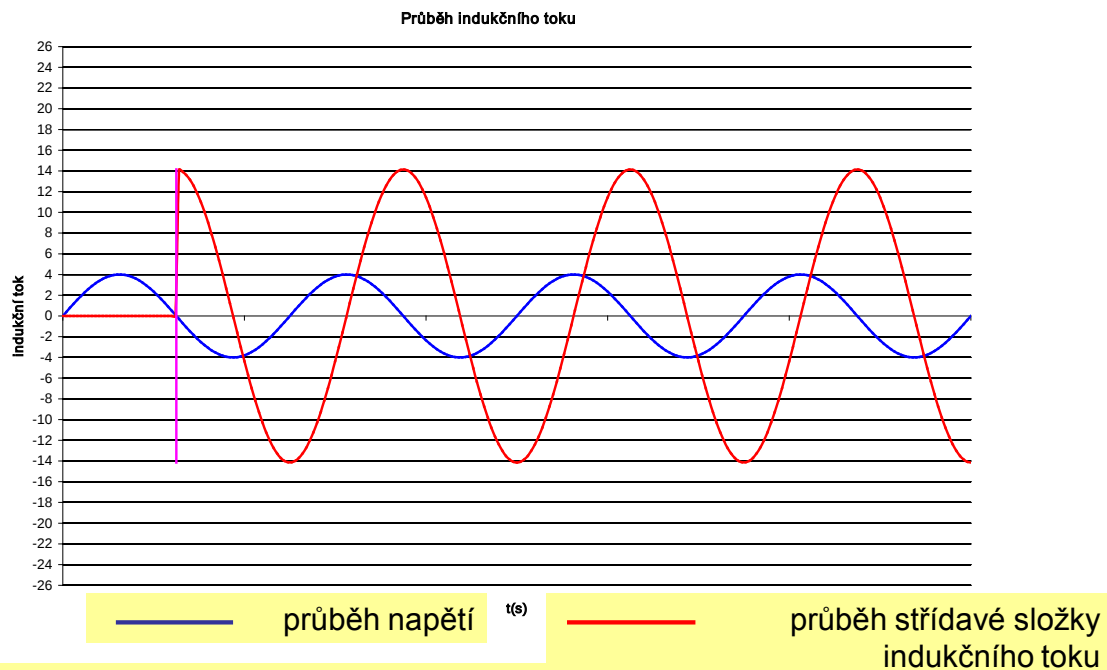
- * indukční tok potřebný k vytvoření magnetického pole je ve fázi s magnetizačním proudem
- * magnetizační proud (proud naprázdno) je zpožděn za napětím o 90° .
- * proud na cívce se nemůže měnit skokem

Základní úvaha:

Proud před připojením transformátoru k síti je nulový, po připojení musí být okamžitě zpožděn za napětím o 90° . Protože nemůže dojít ke skokové změně proudu, vytvoří se stejnosměrná složka, která zvýší amplitudu proudu naprázdno $\Rightarrow$ vznikne proudová ráz.

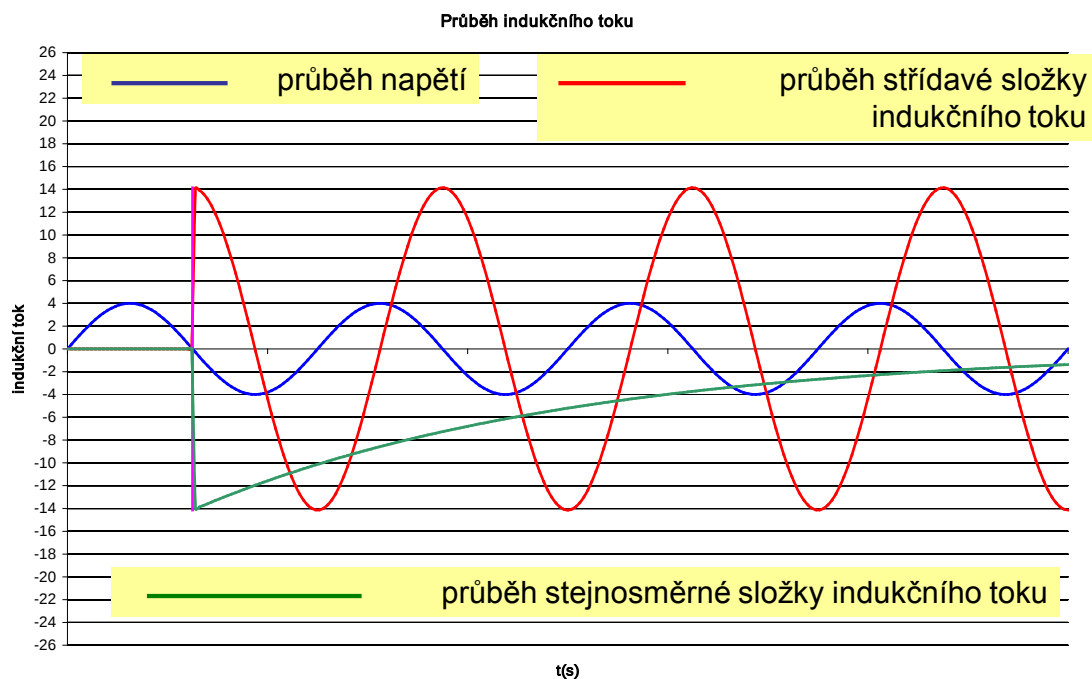
Na čem závisí velikost proudového rázu ?

Na okamžité hodnotě napětí při připojení transformátoru k síti !

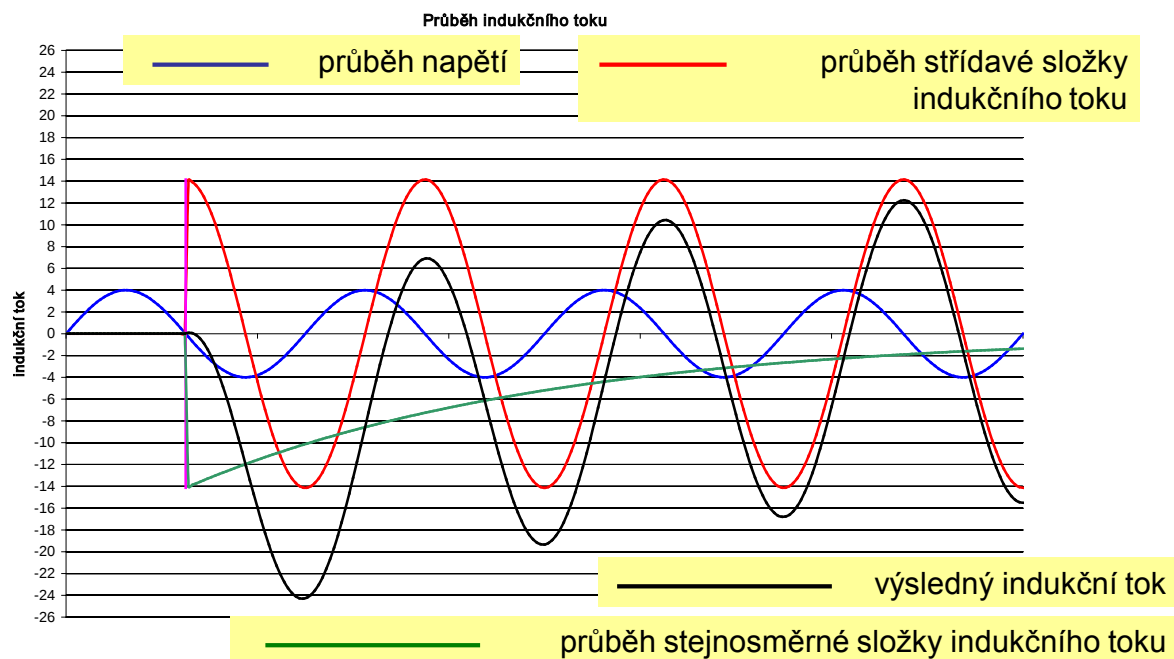


Je znázorněný indukční tok výsledný ?

Ne. Došlo ke skokové změně toku, což není možné

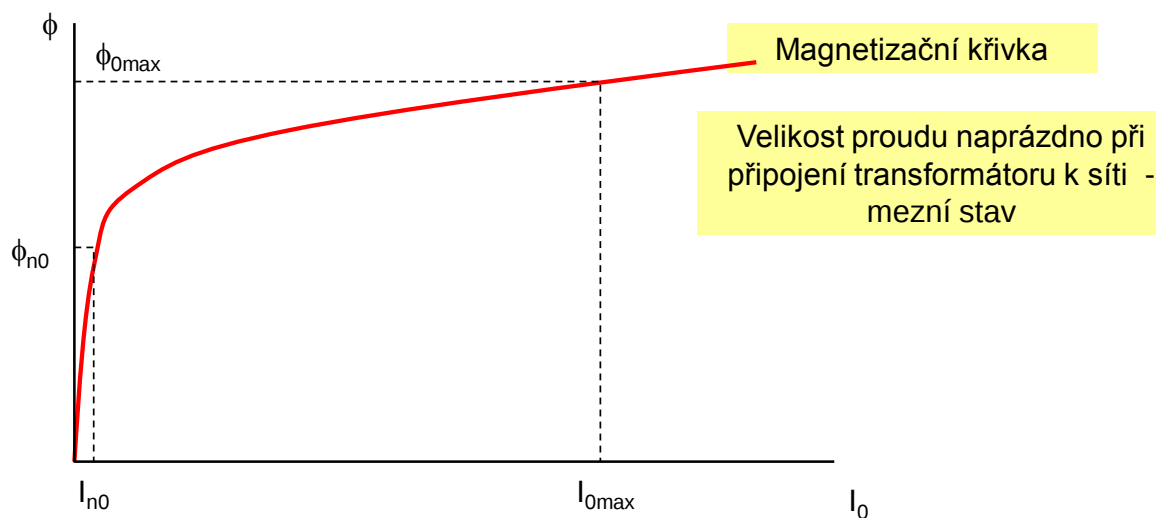


Indukční tok musí vycházet z počátku, proto se vytvoří stejnosměrná složka toku. Počáteční hodnota stejnosměrné složky je stejně velká jako střídavé složky, má však opačné znaménko $\Rightarrow$ výsledná počáteční hodnota indukčního toku je nulová.



Je-li při připojení transformátoru okamžitá hodnota napětí nulová je maximální stejnosměrná složka a tím i maximální amplituda výsledného indukčního toku. Jaká je maximální hodnota výsledné amplitudy ?

Téměř dvojnásobná !



Počáteční hodnota proudu naprázdno $I_{0max} = (20 - 60)I_{n0}$

Absolutní hodnota je dána proudem jmenovitým naprázdno.

Je-li $i_{0\%} = 10 \%$, je maximální proudový ráz $I_{0max} = 6 \cdot I_n \Rightarrow$

Pro jištění transformátoru se používají jističe s charakteristikou D

K1

Přechodové jevy

Zkrat na výstupním vinutí – představuje havarijní stav. Proud může dosáhnou u velkých transformátorů až $30 \cdot I_n$ – zkratová ochrana

Nejhorší je tzv. tvrdý zkrat ($U_1 = \text{konst.}$ a $Z_2 = 0$) velké mechanické a tepelné namáhání, časté poruchy izolace. Konkrétní velikost proudového nárazu závisí na okamžiku vzniku zkratu.

Mezizávitový zkrat – vzniká poškozením izolace uvnitř vinutí

Dochází k vyřazení transformátoru z provozu.

Přepětí na vstupní či výstupní straně – představuje vyšší jak dvounásobné zvýšení napětí nad jmenovitou hodnotu. Doba trvání přepětí je 50 až 250 μs .

Koordinace izolace - transformátor se nachází v nejvyšší izolační hladině

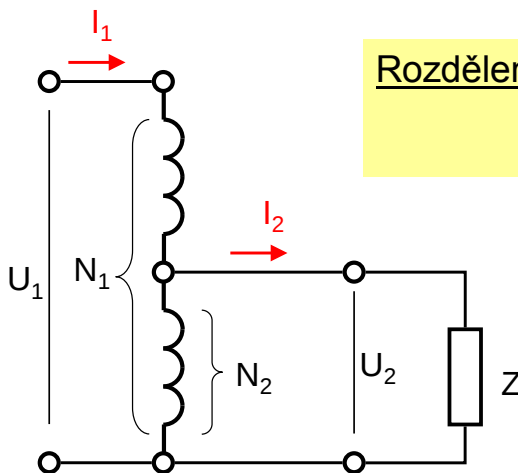
Použití omezovačů přepětí

K1

Autotransformátor

je transformátor, který má pouze jedno vinutí s odbočkou $\Rightarrow$ vstupní a výstupní strana je galvanicky spojena.

Část vinutí je společná pro vstupní a výstupní vinutí a vinutím N_2 prochází rozdíl proudů $I_1 - I_2$ (menší průřez) $\Rightarrow$ úsporný transformátor. Čím menší je rozdíl obou napětí, tím je úspora vyšší.



Rozdělení:

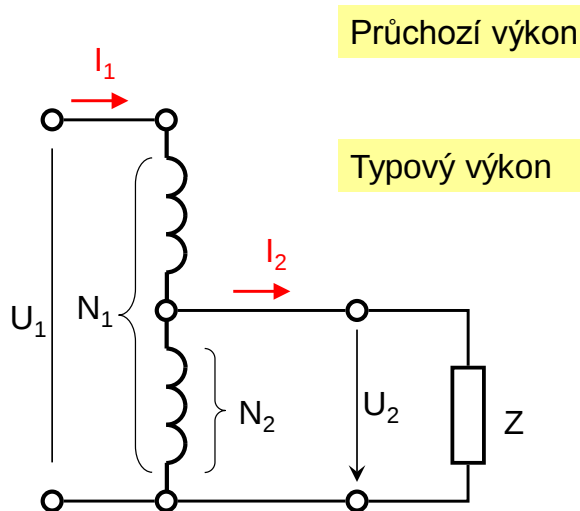
- snižovací ($U_1 > U_2$)
- zvyšovací ($U_1 < U_2$)
- regulační (zpravidla $U_2 = 0 - U_1$)

Převod transformátoru ?

Autotransformátor

Protože je část autotransformátoru společná pro vstupní a výstupní vinutí, liší se průchozí (vnější) - S_p a typový (vnitřní) - S_i výkon.

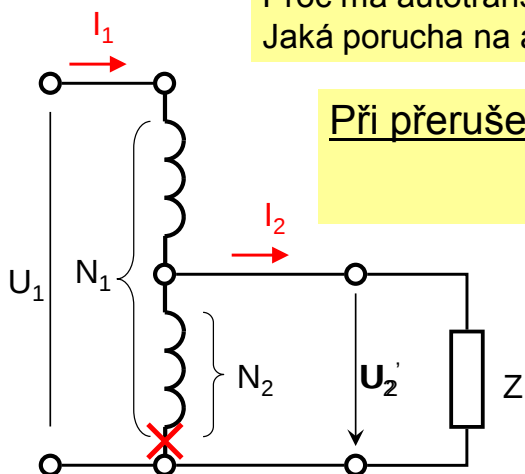
Typový výkon určuje hmotnost a rozměry transformátoru



Autotransformátor

Proč má autotransformátor omezené využití ?

Jaká porucha na autotransformátoru je nebezpečná ?



Jaké bude výstupní napětí U_2' ?

Pro $I_2 = 0$...

Pro $I_2 > 0$...

Použití autotransformátoru:

- * v soustavě vvn pro nejvyšší výkony, například 400/110 kV
- * regulační transformátory (při návrhu ochran je z pohledu bezpečnosti směrodatné napájecí napětí!)

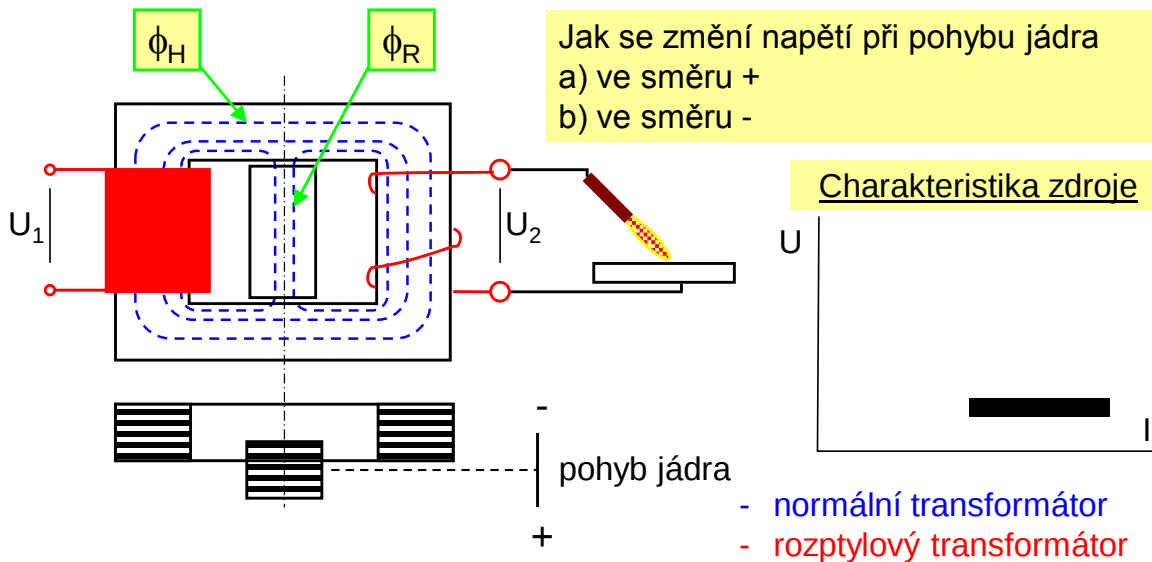
Rozptylový transformátor

je transformátor s úmyslně zvětšeným rozptylovým tokem

⇒ má velkou vnitřní reaktanci

⇒ měkký zdroj napětí

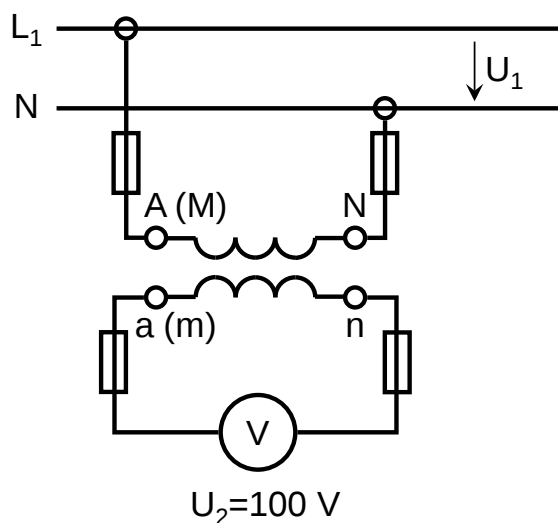
⇒ při zatížení výrazně klesá výstupní napětí



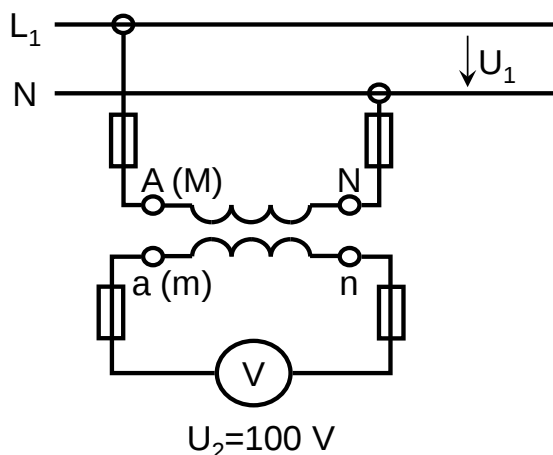
Přístrojové transformátory

se používají ke snížení měřených veličin na hodnoty vhodné pro měřicí přístroje a k napájení ochrany a k oddělení měřících a jistících přístrojů od obvodů vysokého napětí (bezpečnost)

Přístrojový transformátor napětí



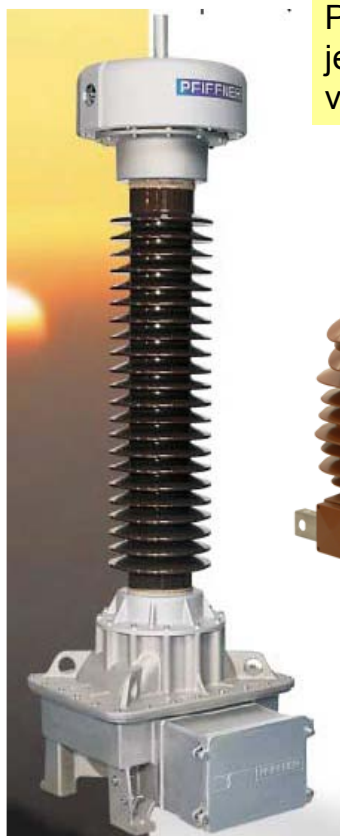
Přístrojový transformátor napětí



- * nové označení svorek - vstup - A, B (N) - výstup - a, b (n)
- staré označení - vstup - M, N - výstup - m, n
- * na výstup se připojují přístroje s velkým vnitřním odporem
- * jedná se o tvrdý zdroj napětí $\Rightarrow$ nutnost jištění
- * výstupní napětí je vždy 100 V
- * chyba úhlu - δ_U – fázový posun mezi U_1 a U_{21}
- chyba napětí - ε_U

$$\varepsilon_u = \frac{U_{21} - U_1}{U_1} \cdot 100\%$$

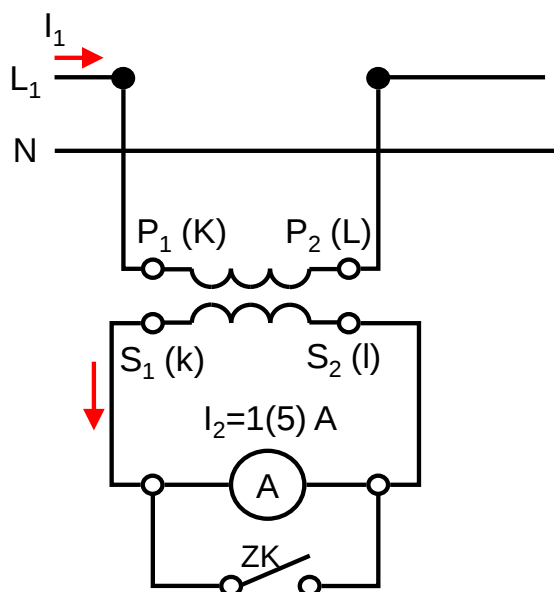
$$\varepsilon_u = \frac{P_u \cdot U_2 - U_1}{U_1} \cdot 100\%$$



Přístrojové transformátory napětí VPT 25 jsou
jednofázové transformátory určené pro použití v sítích
vysokého napětí

jako	měřicí transformátor	napájecí transformátor	
Izolační napětí	25 kV	25 kV	
Zkušební napětí	50 kV	50 kV	
Zkušební napětí rázové	125 kV	125 kV	
Jmenovité prim. napětí	3000 - 22000 V	6000 - 22000 V	
Jmenovité sek. napětí	100, 110, 120 V	100, 110, 120, 230 V	
Jmenovitý kmitočet	50 Hz	50 Hz	
Výkon	10, 30, 50, 75, 100, 150 VA	15 kV	22 kV
		800 VA	500 VA
Třída přesnosti	0.2, 0.5, 1, 3P, 6P	6%	
Krajní výkon	500 VA		
Délka povrchové cesty	930 mm	930 mm	
Hmotnost	49 kg	49 kg	
Schválení	TCM 212/02-3636	TCM 212/02-3636	

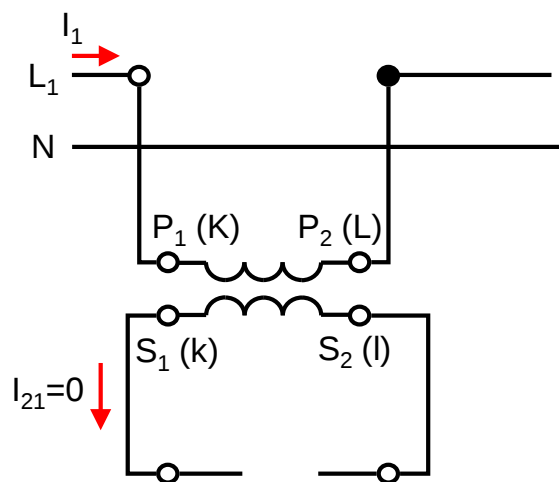
Jsou určeny k měření a jištění rozvodných zařízení vn
venkovního provedení. Jsou vhodné i pro napájení
pohonů dálkově ovládaných úsečníků.



Přístrojový transformátor proudu

- * nové označení svorek - vstup - P_1, P_2 - výstup - S_1, S_2
- staré označení - vstup - K, L - výstup - k, l
- * na výstup se připojují přístroje s malým vnitřním odporem
- * jedná se o tvrdý zdroj proudu $\Rightarrow$ výstupní svorky se nesmí rozpojit
- * výstupní proud je pro měření 5A, pro ochrany 1A

Rozpojení sekundární strany PTP



I_1

$I_{21}' = 0$

Platí $I_1 = I_0' \Rightarrow ?$

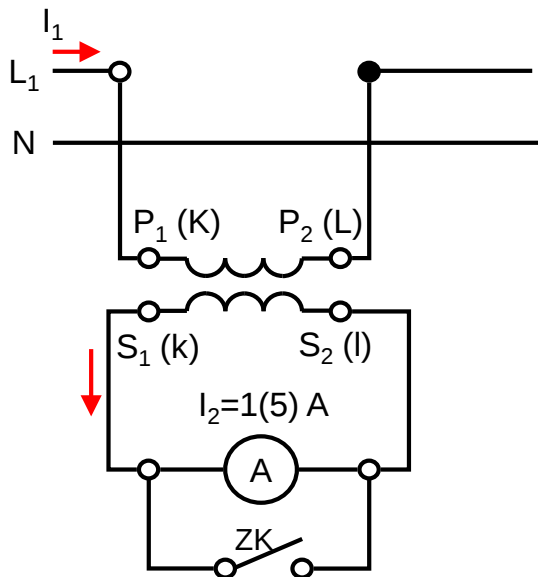
Výrazný nárůst proudu I_0

Jaké jsou důsledky:

* nárůst $I_\mu \Rightarrow$

* nárůst $I_{FE} \Rightarrow$

Přístrojový transformátor proudu



$$\varepsilon_i = \frac{I_{21} - I_1}{I_1} \cdot 100\%$$

$$\varepsilon_i = \frac{p_i \cdot I_2 - I_1}{I_1} \cdot 100\%$$

- * chyba úhlu - δ_i - fázový posun mezi I_1 a I_{21}
- * chyba proudu - ε_i
- * nadproudé číslo - násobek jmenovitého vstupního proudu, při kterém dosáhne chyba proudu 10%
- * třída přesnosti - celkový vliv chyb na přesnost měření (%)

Podpěrný přístrojový transformátor proudu CTSO 38 je určen k měření a jistění rozvodných zařízení vn venkovního provedení pro jmenovité primární proudy 5–2500 A a nejvyšší napětí soustavy 38.5 kV.



Izolační napětí	38.5 kV
Zkušební napětí	80 kV
Zkušební napětí rázové	180 kV
Jmenovitý prim. proud	5-2500 A
Jmenovitý sek. proud	5 (1) A
Jmenovitý kmitočet	50 Hz
Výkon	5-60 VA
Třída přesnosti	0.2, 0.5, 0.2S, 0.5S, 1, 3P, 10P
Délka povrchové cesty	1257 mm
Hmotnost	62 kg
Schválení	TCM 212/99-3179

Přístrojový transformátor CLA 3.1 proudu nízkého napětí

Izolační napětí 0,72 kV, zkušební napětí 3 kV, 50 - 60 Hz, $I_{nomin} = 60 \times I_{1n}$, $I_{2n} = 10 \times I_{1n}$

Primární pas 80x10 mm
2x 60x30 mm
Kulatý vodič Ø 51 mm
Šířka transformátoru 130 mm

Rozsah primárních proudů 200 – 1 500 A

CLA 3.1							
		Třída přesnosti 0,5		Třída přesnosti 1		Třída přesnosti 3	
Primární proud [A]	Jmen. výkon [VA]	Objednací kód	Jmen. výkon [VA]	Objednací kód	Jmen. výkon [VA]	Objednací kód	Jmen. výkon [VA]
200	-	-	-	-	7,5	0498	-
300	2,5	0169	5	0177	7,5	0185	-
400	5	0170	10	0178	10	0186	-
500	7,5	0171	15	0179	15	0187	-
600	10	0172	15	0180	15	0188	-
750	15	0173	15	0181	15	0189	10
800	10	0522	-	-	-	-	10
1000	15	0174	30	0182	30	0190	10
1250	15	0175	30	0183	30	0191	-
1500	15	0176	30	0184	45	0192	10

Jmenovité výkony uvedené v tabulce jsou výkony maximální. Je samozřejmě možné dodat transformátor s menším jmenovitým výkonem (pozor, jiný objednací kód).
V tabulce jsou uvedeny transformátory s převodem na 5A. Všechny uvedené transformátory dodáváme i s převodem na 1A (pozor, jiný objednací kód).



Tlumivky

mají podobnou konstrukci jako transformátor s jedním vinutím. Zvyšuje indukčnost obvodu, vlivem přerušovaného magnetického obvodu zůstává indukční reaktance přibližně konstantní

Rozdělení podle konstrukce:

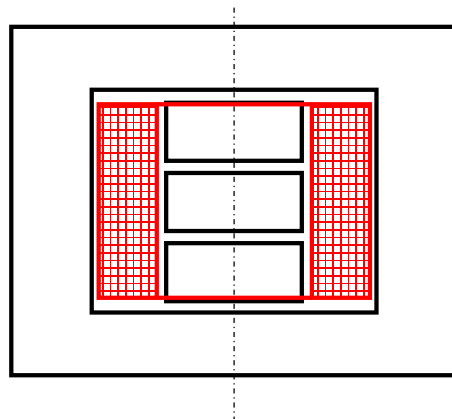
- a) železné jádro má nemagnetické mezery
- b) cívka je bez jádra (reaktor)

Rozdělení podle zapojení:

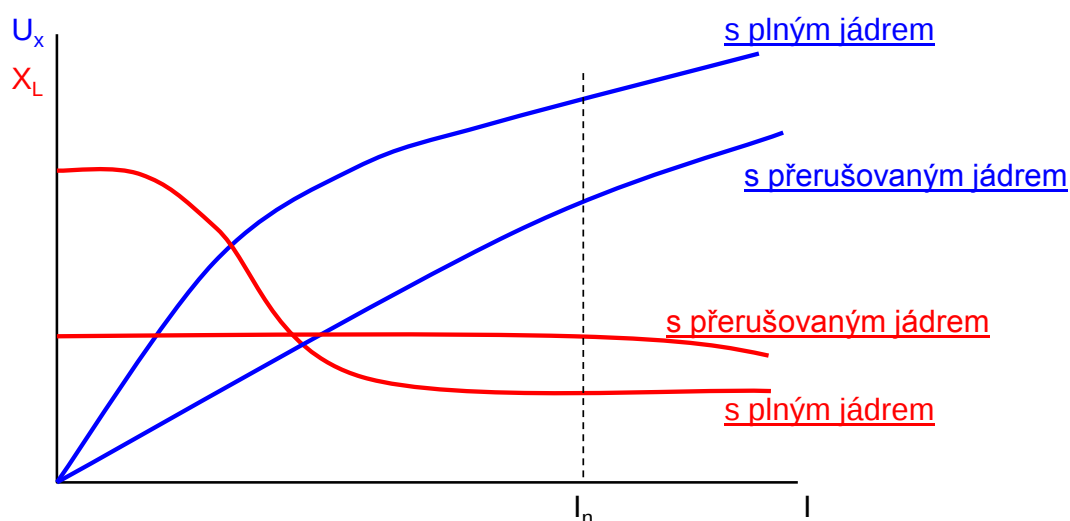
- a) sériové
- b) paralelní

Parametry tlumivek:

- a) izolační napětí (U) – napětí sítě
- b) reaktanční napětí (U_x) – úbytek napětí na tlumivce při jmenovitém proudu
- c) jmenovitý proud (I_n)
- d) jalový výkon (typový) (Q)
- e) indukčnost tlumivky (L)
- f) činné ztráty (P)



Charakteristika tlumivky



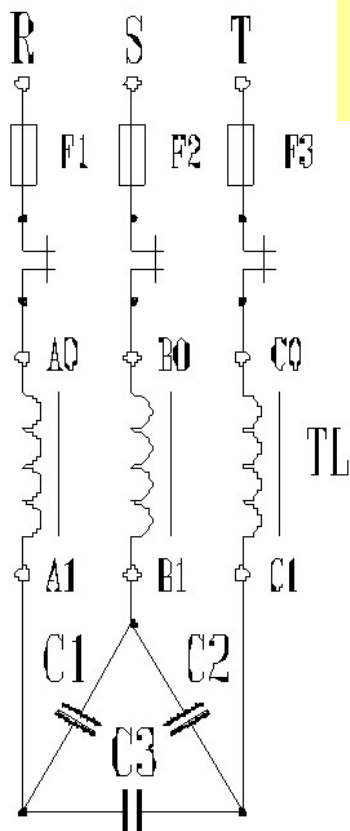
Cívka s plným jádrem

– vlivem nasycení se výrazně mění indukční reaktance

Cívka s přerušovaným jádrem

– do jmenovitého proudu zůstává indukční reaktance přibližně konstantní

K1

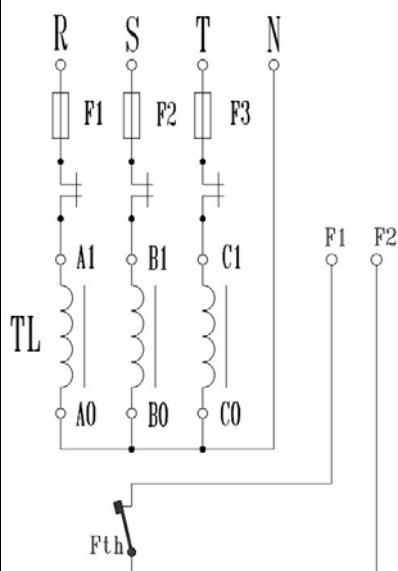


Kompenzační trojfázová tlumivka - pro ochranu kondenzátorových baterii před nepříznivými účinky vyšších harmonických v kompenzované síti.



Provedení:

- tlumivky jsou navrženy s nízkými ztrátami a vysokou jakostí
- vakuová impregnace celé tlumivky
- vestavěné teplotní čidlo (rozpínací bimetalové) vyvedené na samostatné svorky
- **Kmitočet:** 50Hz
- **Chlazení:** AN – přirozené vzduchové
- **Třída izolace:** F (Ta40/F)
- **Krytí:** IP00 (vestavné provedení)
- **Třída ochrany:** I, s ochrannou svorkou
- Tlumivky jsou dodávány pro různá napětí kondenzátorové baterie a různé stupně zatlumení



dekompenzační trojfázová tlumivka

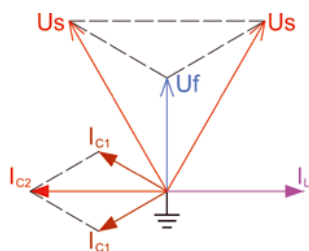


Tlumivky dekompenzační jsou určeny:

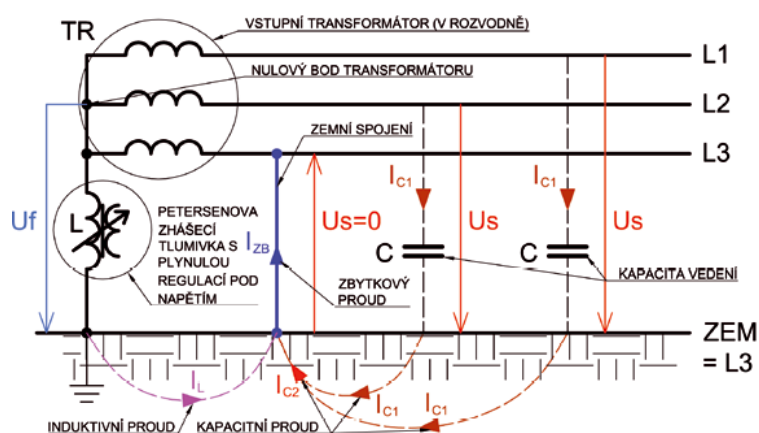
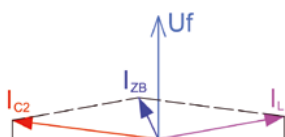
- Obecně pro dekompenzaci kapacitního jalového výkonu.
- Dekompenzaci kapacity v dálkových napájecích kabelech a kabelových rozvodných sítích nízkého napětí.
- Pro vytvoření kaskády dekompenzačních tlumivek pro stupňovitou regulaci přepínatelnou podle provozního stavu kapacitní zátěže připojených úseků kabelové sítě.

Petersenovy zhášecí tlumivky

- Ideální fáz. diagram



- zbytkový proud



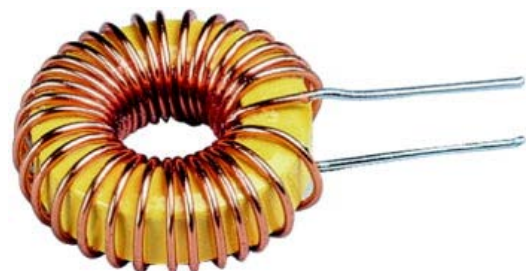
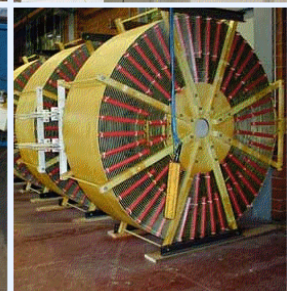
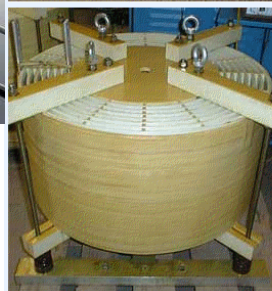
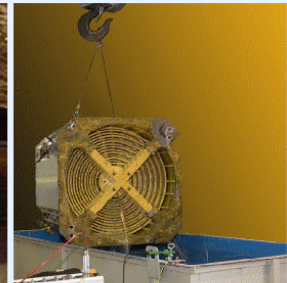
Vzduchové mezery jsou plynule nastavitelné do požadované polohy. Velikost vzduchových mezer se plynule přestavuje pomocí mechanismu poháněného elektromotorem s převodovkou, který je řízen elektronickým regulátorem a tak zaručuje velkou přesnost nastavení a spolehlivost mechanismu. Indukčnost tlumivky je tak neustále přizpůsobována parametrům sítě, dostatečně přesně ji kompenzuje a tím chrání.



Petersonova
tlumivka
125kVA, 6.3kV



reaktor



Návrh jednofázového transformátoru

jedná se o návrh malého jednofázového transformátoru.

Úkoly pro výpočet:

- elektrický a magnetický výpočet
 - magnetický obvod
 - počty závitů
 - průřez (průměr) vodiče
- konstrukční návrh (kostra, izolace, provedení vývodů, impregnace)
- kontrola parametrů (převod, impedance, napětí nakrátko, proud naprázdno, hmotnost, ztráty, účinnost, zkratový proud)

Pro výpočet existuje více postupů, které se liší přesností a náročností. Je třeba mít na paměti, že magnetické poměry na transformátoru nelze vypočítat přesně a výpočet je vždy zatížen určitou chybou.

Návrh jednofázového transformátoru

Vstupní hodnoty pro výpočet :

vstupní napětí U_1 , výstupní napětí U_{21} , U_{22} , ..., výstupní proud I_{21} , I_{22} , ..., magnetický obvod – EI plechy

1. Výpočet výkonu - S_2

$$S_2 = U_{21} * I_{21} + U_{22} * I_{22} + \dots$$

2. Výpočet příkonu - S_1

Z tabulky pro vypočtený výkon určíme účinnost, ze které vypočítáme příkon. Musí platit $S_1 < S_{1t}$. Není-li podmínka splněna, volíme o stupeň vyšší.

3. Volba magnetického obvodu

Z tabulky podle vypočteného příkonu určíme typ magnetického obvodu

Tab. 2.13. Tabuľka pro jádra EI

Typ EI	S_{11} (V · A)	Účinnost (%)	B_m (T)	J (A · mm ⁻²)	Δu_R (%)	Počet závitů na 1 V	
						0,5 mm	0,35 mm
10 × 8	1	60	1,1	5,0	56,5	50,5	66,2
10 × 10	2	60	1,1	5,0	49,0	47,5	53,0
10 × 12,5	3	60	7,7	5,0	42,5	37,8	42,5
10 × 16	4	60	1,1	5,0	36,8	29,6	33,1
12 × 10	2	65	1,2	4,7	40,5	39,4	34,0
12 × 11,5	3	65	1,2	4,7	34,8	31,5	35,2
12 × 16	5	65	1,2	4,7	29,8	24,8	27,6
12 × 20	7	65	1,2	4,7	26,0	10,7	22,1
16 × 12,5	6	70	1,25	4,3	26,8	23,7	26,5
16 × 16	8	70	1,25	4,3	23,0	18,5	20,6
16 × 20	10	70	1,25	4,3	20,0	14,8	16,5
16 × 25	12	70	1,25	4,3	17,8	11,85	13,3
20 × 16	14	71	1,25	3,9	20	14,8	16,5
20 × 20	17,5	73	1,25	3,9	16,5	11,85	13,3
20 × 25	21	72	1,25	3,9	14,5	9,58	10,2
20 × 32	27	75	1,25	3,9	12,6	7,36	8,35
25 × 20	30	74	1,25	3,7	14,65	9,85	10,2
25 × 25	35	78,5	1,25	3,75	12,8	7,66	8,0
25 × 32	47	79,5	1,25	3,6	10,53	5,92	6,6
25 × 40	54	80,2	1,25	3,52	9,17	4,74	5,3
32 × 25	68	82	1,25	3,26	10,3	5,92	6,6
32 × 32	85	84,5	1,25	3,29	9,2	4,65	5,17
32 × 40	100	84,5	1,1	3,3	8,72	3,39	4,16
32 × 50	123	85,4	1,05	3,3	8,1	2,96	3,3
40 × 32	143	85,5	1,1	2,88	8,1	3,69	4,12
40 × 40	175	87	1,05	2,82	7,34	2,96	3,3
40 × 50	203	87,7	1,0	2,84	6,7	2,37	2,65
40 × 64	248	88	0,95	2,88	6,2	1,84	2,06

Tab. 2.13. Tabuľka pro jádra EI

Typ EI	S_{11} (V · A)	Účinnost (%)	B_m (T)	J (A · mm ⁻²)	Δu_R (%)	Počet závitů na 1 V		Magnetický obvod			
						0,5 mm	0,35 mm	S_{Fe} (cm ²)		l_{Fe} (cm)	m_{Fe} (g)
								0,5 mm	0,35 mm		
10 × 8	1	60	1,1	5,0	56,5	50,5	66,2	0,76	0,68	5,2	40
10 × 10	2	60	1,1	5,0	49,0	47,5	53,0	0,95	0,85	5,2	50
10 × 12,5	3	60	7,7	5,0	42,5	37,8	42,5	1,19	1,06	5,2	60
10 × 16	4	60	1,1	5,0	36,8	29,6	33,1	1,52	1,36	5,2	70
12 × 10	2	65	1,2	4,7	40,5	39,4	34,0	1,14	1,02	7,1	70
12 × 11,5	3	65	1,2	4,7	34,8	31,5	35,2	1,43	1,28		80
12 × 16	5	65	1,2	4,7	29,8	24,8	27,6	1,82	1,63		110
12 × 20	7	65	1,2	4,7	26,0	10,7	22,1	2,28	2,04		130
16 × 12,5	6	70	1,25	4,3	26,8	23,7	26,5	1,90	1,70	8,9	150
16 × 16	8	70	1,25	4,3	23,0	18,5	20,6	2,43	2,18		190
16 × 20	10	70	1,25	4,3	20,0	14,8	16,5	3,04	2,72		230
16 × 25	12	70	1,25	4,3	17,8	11,85	13,3	3,80	3,4		290
20 × 16	14	71	1,25	3,9	20	14,8	16,5	3,04	2,72	11,1	285
20 × 20	17,5	73	1,25	3,9	16,5	11,85	13,3	3,8	3,4		360
20 × 25	21	72	1,25	3,9	14,5	9,58	10,2	4,7	4,4		440
20 × 32	27	75	1,25	3,9	12,6	7,36	8,35	6,1	5,4		570
25 × 20	30	74	1,25	3,7	14,65	9,85	10,2	4,7	4,4	13,9	560
25 × 25	35	78,5	1,25	3,75	12,8	7,66	8,0	5,9	5,3		680
25 × 32	47	79,5	1,25	3,6	10,53	5,92	6,6	7,6	6,8		890
25 × 40	54	80,2	1,25	3,52	9,17	4,74	5,3	9,5	8,5		1080
32 × 25	68	82	1,25	3,26	10,3	5,92	6,6	7,6	6,8	17,8	1070
32 × 32	85	84,5	1,25	3,29	9,2	4,65	5,17	9,7	8,7		1370
32 × 40	100	84,5	1,1	3,3	8,72	3,39	4,16	12,2	10,9		1710
32 × 50	123	85,4	1,05	3,3	8,1	2,96	3,3	15,2	13,6		2150
40 × 32	143	85,5	1,1	2,88	8,1	3,69	4,12	12,2	10,9	22,3	2170
40 × 40	175	87	1,05	2,82	7,34	2,96	3,3	15,2	13,6		2780
40 × 50	203	87,7	1,0	2,84	6,7	2,37	2,65	19,0	17,0		3380
40 × 64	248	88	0,95	2,88	6,2	1,84	2,06	24,4	21,8		4250

3. Volba magnetického obvodu výpočtem:

$$S_{FE} = (6 - 8) * \sqrt{\frac{S_1}{f}}$$

Konstantou 6 – 8 ovlivňujeme poměr „železa a mědi“. Pro konstantu 6 je menší průřez jádra a větší počet závitů $\Rightarrow$ nižší ztráty v železe a vyšší ztráty ve vinutí. Pro konstantu 8 jsou poměry opačné

4. Počet závitů na jeden volt:

kde $B_{\max}$ a S_{FE} zjistíme z tabulky

$$N_{1V} = \frac{10^4}{4,44 * B_{\max} * S_{FE} * f}$$

Musí platit: vypočtená hodnota je menší než tabulková hodnota

5. Výpočet počtu závitů na vstupní straně:

$$N_1 = U_1 * N_{1V}$$

6. Výpočet počtu závitů na výstupní straně:

Při výpočtu se uvažuje vliv úbytku napětí, velikost úbytku zjistíme z tabulky

$$N_{21} = N_{1V} * (1 + \Delta u_R) * U_{21}$$

7. Výpočet vstupního proudu:

$$I_1 = \frac{S_1}{U_1}$$

8. Výpočet průměru (průřezu) vinutí:

kde J je dovolená proudová hustota, určuje se z tabulky

$$S_{v1} = \frac{I_1}{J}$$

$$S_{v21} = \frac{I_{21}}{J}$$

Příklad výpočtu

Zadané hodnoty:

$$U_1 = 230V, U_2 = 48V, I_2 = 3A$$

1. Výpočet výkonu:

$$S_2 = U_2 \cdot I_2 =$$

2. Určení účinnosti:

z tabulky volíme účinnost 87 %

3. Výpočet příkonu:

$$S_1 = S_2 / \eta =$$

4. Volba magnetického obvodu:

EI 40 x 40

5. Výpočet počtu závitů na 1V:

$$B_{\max} = 1,05 \text{ T}, S_{FE} = 15,2 \text{ cm}^2$$

$$N_{1V} = \frac{10^4}{4,44 \cdot B_{\max} \cdot S_{FE} \cdot f} = \frac{10^4}{4,44 \cdot 1,05 \cdot 15,2 \cdot 50} = 2,822$$

6. Výpočet počtu závitů na vstupu:

$$N_1 = N_{1V} \cdot U_1 =$$

7. Určení úbytku napětí Δu_R

$$\Delta u_{R\%} =$$

8. Určení počtu závitů na výstupu:

$$N_{21} = N_{1V} \cdot (1 + \Delta u_R) \cdot U_{21} =$$

9. Výpočet vstupního proudu:

$$I_1 = S_1 / U_1 =$$

10. Určení proudové hustoty:

$$J = 2,82 \text{ A/mm}^2$$

11. Určení průřezu vodiče

$$S_1 = I_1 / J =$$

$$S_2 = I_2 / J =$$

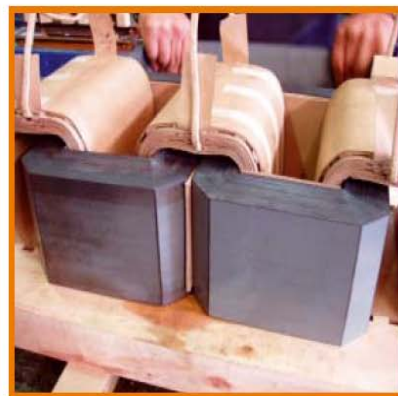
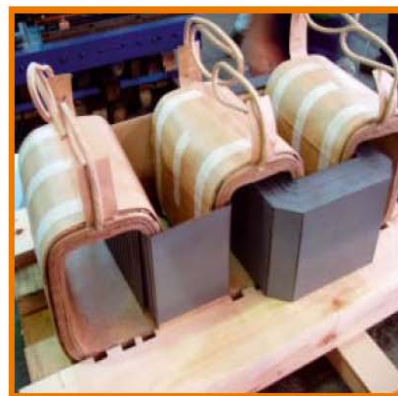
Typ EI	S_{11} (V · A)	Účinnost (%)	B_m (T)	J (A · mm ⁻²)	Δu_R (%)
10 × 8	1	60	1,1	5,0	56,5
10 × 10	2	60	1,1	5,0	49,0
10 × 12,5	3	60	7,7	5,0	42,5
10 × 16	4	60	1,1	5,0	36,8
12 × 10	2	65	1,2	4,7	40,5
12 × 11,5	3	65	1,2	4,7	34,8
12 × 16	5	65	1,2	4,7	29,8
12 × 20	7	65	1,2	4,7	26,0
16 × 12,5	6	70	1,25	4,3	26,8
16 × 16	8	70	1,25	4,3	23,0
16 × 20	10	70	1,25	4,3	20,0
16 × 25	12	70	1,25	4,3	17,8
20 × 16	14	71	1,25	3,9	20
20 × 20	17,5	73	1,25	3,9	16,5
20 × 25	21	72	1,25	3,9	14,5
20 × 32	27	75	1,25	3,9	12,6
25 × 20	30	74	1,25	3,7	14,65
25 × 25	35	78,5	1,25	3,75	12,8
25 × 32	47	79,5	1,25	3,6	10,53
25 × 40	54	80,2	1,25	3,52	9,17
32 × 25	68	82	1,25	3,26	10,3
32 × 32	85	84,5	1,25	3,29	9,2
32 × 40	100	84,5	1,1	3,3	8,72
32 × 50	123	85,4	1,05	3,3	8,1
40 × 32	143	85,5	1,1	2,88	8,1
40 × 40	175	87	1,05	2,82	7,34
40 × 50	203	87,7	1,0	2,84	6,7
40 × 64	248	88	0,95	2,88	6,2

- Transformátor 100 kVA,



- Třífázový transformátor plášťový (4 jádra)

- Příklad olejového distribučního transformátoru 50 kVA



Příklady:

Příklad 1

Jednofázový transformátor má tyto údaje: jmenovité napětí $U_{1N}=6300V$, napětí naprázdno $U_{20}=500V$, počet závitů $N_1=4200$, frekvence $f=50Hz$ a průřez jádra $S=60 \cdot 10^{-4}m^2$. Ztráty zanedbejte.

Určete magnetickou indukci v jádře B_m a počet závitů sekundární cívky N_2

Příklad 2

Jednofázový transformátor má tyto údaje: jmenovité napětí $U_{1N}=1000V$, $U_{2N}=230V$, jmenovitý výkon $S_N=5000VA$, počet závitů $N_1=700$, frekvence $f=50Hz$ a průřez jádra $S=46 \cdot 10^{-4}m^2$. Ztráty zanedbejte.

Určete magnetickou indukci v jádře B_m , počet závitů sekundární cívky N_2 , převod transformátoru p , a jmenovité proudy I_{1N} a I_{2N}

Příklad 3

Jednofázový transformátor má tyto údaje: jmenovité napětí $U_{1N}=230V$, $U_{2N}=125V$ a jmenovitý proud $I_{1N}=25A$. Naměřené napětí nakrátko $U_{1K}=18.4V$.

Určete procentní napětí nakrátko a skutečné ustálené zkratové proudy I_{1K} a I_{2K}

Příklad 4

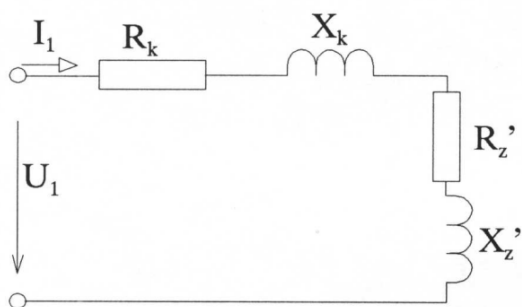
U třífázového transformátoru o výkonu $S_N=250kVA$ a jmenovitém napětí $U_{1N}=10kV$ bylo při chodu nakrátko zjištěno napětí nakrátko $U_{1K}=530V$ a ztráty nakrátko $\Delta P_K=3,5kW$

Určete procentní napětí nakrátko u_K , účinník nakrátko $\cos\phi_K$, jmenovitou impedanci Z_N a impedanci nakrátko Z_K pro 1 fázi

Příklad 5

Jsou známy tyto parametry transformátoru: $R_k=0,4 \Omega$, $X_k=2 \Omega$, převod $p=0,8$, napájecí napětí $U_1=120 V$. Transformátor je zatížen sériovou kombinací rezistoru $R_z=2 \Omega$ a cívky $X_z=3 \Omega$. Určete činný výkon, který odebírá zátěž.

Používejte zjednodušené náhradní schéma tzn. předpokládejte, že odpor reprezentující ztráty v železe $R_{Fe} \rightarrow \infty$ a rovněž hlavní reaktance transformátoru $X_{1h} \rightarrow \infty$.



Příklad 6

Měřením v laboratoři byly u transformátoru zjištěny tyto hodnoty: $U_{1k}=11V$, $I_{1k}=5A$, $P_{1k}=50W$, $U_{10}=230V$, $U_{20}=125V$. Jaké bude výstupní napětí U_2 transformátoru, jestliže na vstupní straně bude napětí $U_1=230V$, $f=50Hz$ a jeho výstup zatížíte kondenzátorem $C_z=600\mu F$?

Indukční stroje



Úvod

Indukční stroj je nejpoužívanější a nejrozšířenější elektrický točivý stroj a jeho význam neustále roste (postupná náhrada stejnosměrných strojů).

Rozdělení podle toku energie:

- indukční motor
- indukční generátor
- indukční brzda

Rozdělení podle počtu fází:

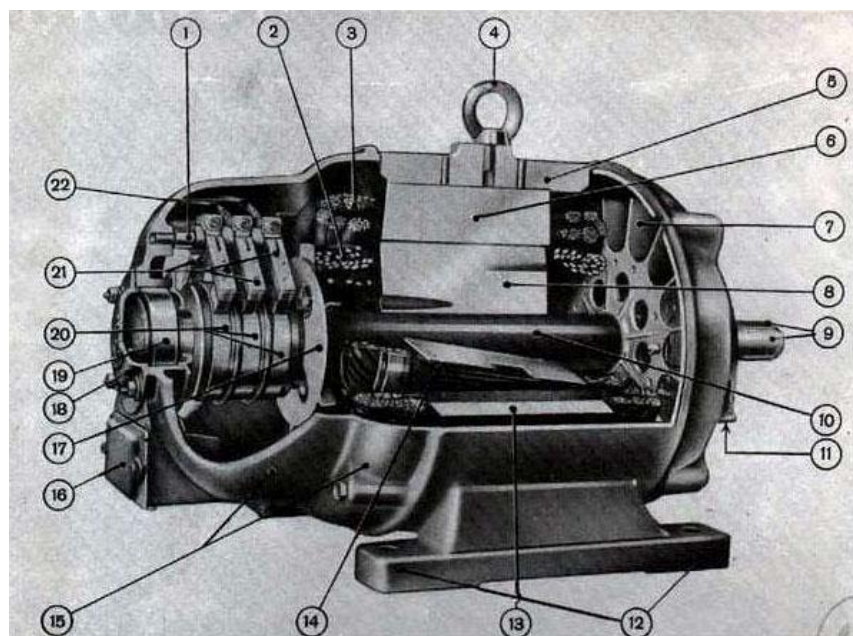
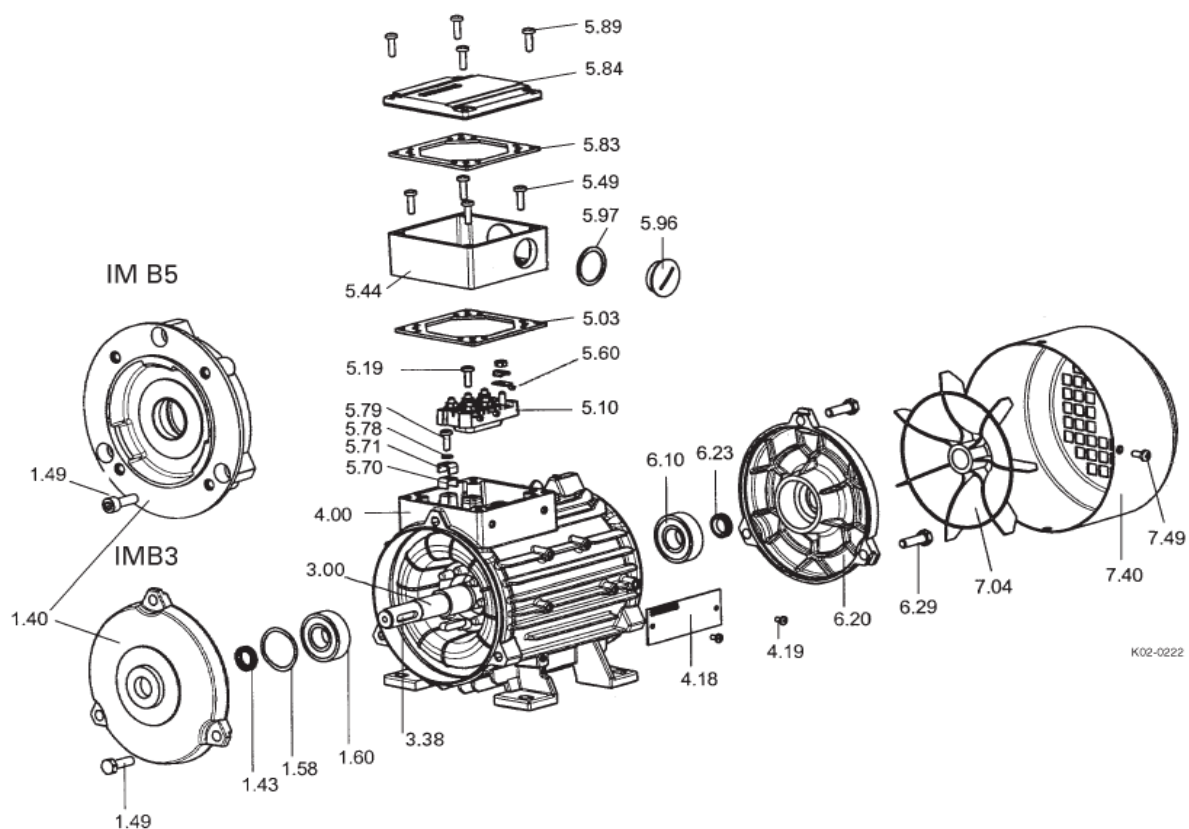
- jednofázové
- trojfázové

Rozdělení podle konstrukce rotoru:

- rotor nakrátko
- kroužkový motor
- speciální rotor

Rozdělení podle pohybu motoru:

- rotační pohyb
- lineární pohyb



1 - svorník, na kterém jsou uloženy kartáče, 2 - rotorové vinutí, 3 - statorové vinutí, 4 - oko, 5 - kostra statoru, 6 - statorové plechy, 7 - ventilátor, 8 - rotorové plechy, 9 - volný konec hřídele, 10 - hřídel, 11 - ventilační otvor, 12 - patky motoru, 13 - statorové plechy, 14 - rotorové plechy, 15 - ložiskové víko, 16 - rotorová svorkovnice, 17 - ventilátor, 18 - ložiskové víko, 19 - kuličkové ložisko, 20 - sběrací kroužky, 21 - sběrací kartáče, 22 - kablíky od sběracích kartáčů

Základní konstrukční údaje

1. Tvar motoru - IM x x (např. IM B 3)

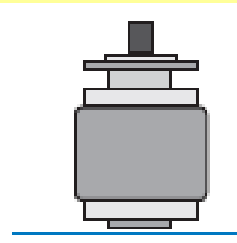
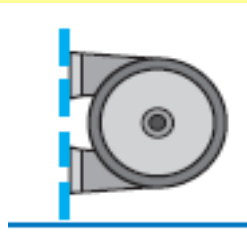
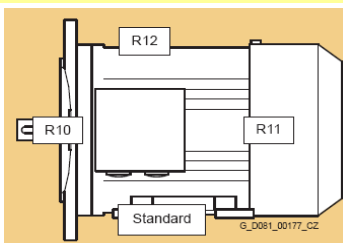
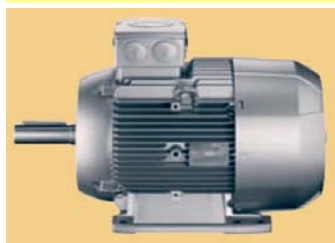
- IM mezinárodní označení pro tvar motoru
1. písmeno B (horizontální) nebo V (vertikální) pozice hřídele
 2. číslo bližší konstrukční specifikace tvaru motoru

Základní rozdělení:

- * patkový stroj (upevňovací šrouby jsou kolmo na osu motoru)
- * přírubový stroj (upevňovací šrouby jsou rovnoběžně s osou motoru)

Další konstrukční možnosti tvaru motoru:

- * poloha hřídele (horizontální, vertikální, obecná)
- * u patkového stroje způsob upevnění motoru (vodorovně, kolmo, ...)



Základní konstrukční údaje

2. Chlazení motoru - IC xxx (např. IC 416)

- IC mezinárodní označení pro chlazení motoru
- číslo bližší konstrukční specifikace chlazení motoru

Základní rozdělení:

- * závislé chlazení (ventilátor je na hřídeli motoru)
- * nezávislé chlazení (ventilátor má vlastní, nezávislý motor)

Další konstrukční možnosti chlazení motoru:

- * přímé nebo nepřímé (přes kostru motoru) chlazení aktivních částí
- * otevřený nebo uzavřený motor (je dáno krytím motoru)
- * druh chladicího média (u malých a středních výkonů vzduch)
- * oběh chladicího média (uzavřený nebo otevřený)
- * nasávání a výstup chladicího média (z/do okolí motoru nebo do stejného/jiného prostoru)

Základní konstrukční údaje

3. Krytí motoru - IP xx (např. IP 55)

stejně označení jako u přístrojů

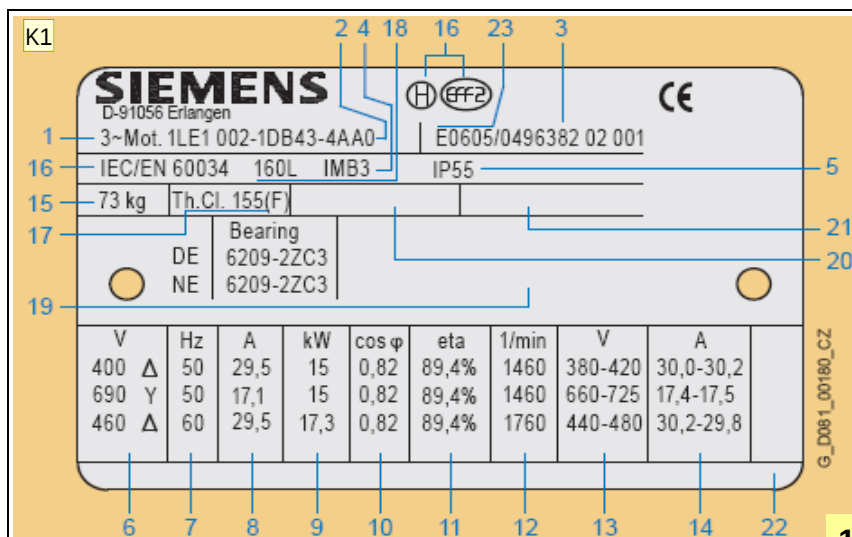
Základní rozdělení:

- * otevřené motory (minimální využití)
- * uzavřené motory (nejčastější použití)

4. Další možné technické vybavení motorů (přídavné zařízení)

- * ochranná stříška (vertikální poloha motoru, strana ventilátoru nahore)
- * tepelná ochrana motoru – bimetalové spínače, termistory typu PTC nebo NTC, čidla ve spojení s měniči kmitočtu. Počet čidel je dán požadavky pohonu.
- * impulsní snímač otáček motoru
- * elektromagnetická brzda motoru
- * cizí chlazení (jako přídavný modul)

Některé moduly mohou být v jednom zařízení (snímač otáček a brzda)



Štítek motoru

1. typ stroje
2. objednáč. číslo
3. výrobní číslo
4. tvar stroje (IM B3)
5. krytí (IP 55)
6. jmenovité napětí a způsob zapojení statorového vinutí
7. jmenovitý kmitočet
8. jmenovitý proud
9. jmenovitý výkon

10. jmenovitý účinník
11. jmenovitá účinnost
12. jmenovité otáčky
13. pracovní napěťový rozsah
14. rozsah proudů podle velikosti napětí
15. hmotnost
17. třída izolace (F-155°)

18. velikost motoru (osová výška hřídele a délka kostry svazku)
- 19 – 22 specifické údaje pro speciální provedení (nadmořská výška, provozní teplota)
- 23 – datum výroby

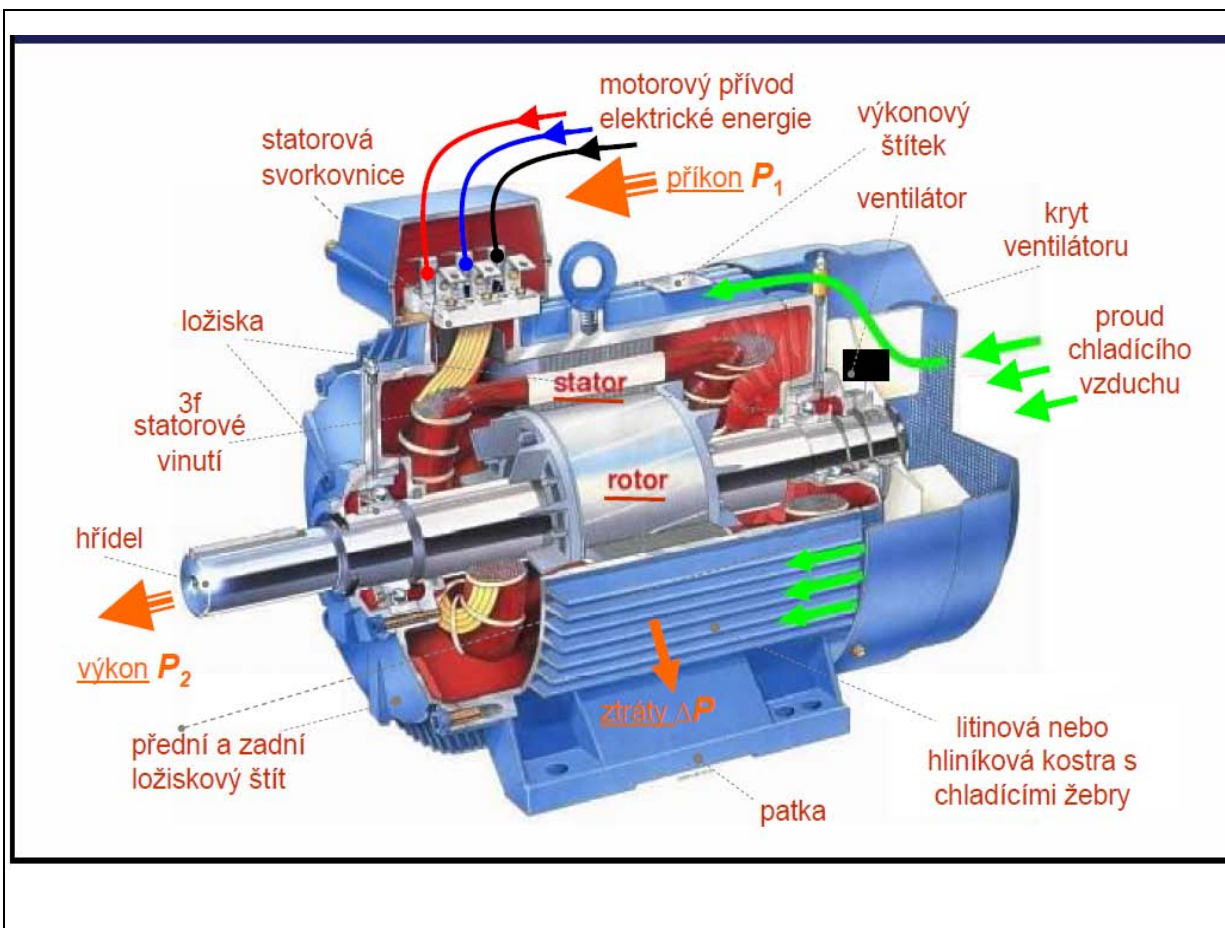
Základní údaje z katalogu

Jmen. výkon	Velikost	Objednací číslo	Otáčky	Parametry při jmenovitém výkonu					Poměrný záběrný moment Mz / Mn při přímém spouštění	Poměrný záběrný proud Ik / In při přímém spouštění	Poměrný moment zvratu Mmax / Mn	Momen- tová třída	Momen- tová charak- teris- tika Diagram č. (str. 15)	Moment setrvač- nosti J	Hmot- nost
				Účinnost		Účinník cos φ	Jmenovitý proud při 400 V	Jmenovitý moment							
				η											
				100%	75%										
Označení pro napětí a tvar viz tabulka níže															
2-pól, 3000 min ⁻¹ , 50Hz			min ⁻¹	%	%	A	Nm	-	-	-	KL	(str. 15)	kg m ²	Tvar IM B3	
kW															
0,09	56	1LA7 050-2AA	2830	63	62	0,81	0,26	0,3	2,0	3,7	2,3	16	1	0,00015	3,0
0,12	56	1LA7 053-2AA	2800	65	64	0,83	0,32	0,41	2,1	3,7	2,4	16	1	0,00015	3,0
0,18	63	1LA7 060-2AA	2820	63	62	0,82	0,51	0,61	2,0	3,7	2,2	16	1	0,00018	3,5
0,25	63	1LA7 063-2AA	2830	65	65	0,82	0,68	0,84	2,0	4,0	2,2	16	1	0,00023	4,1
0,37	71	1LA7 070-2AA	2740	66	65	0,82	1,00	1,3	2,3	3,5	2,3	16	1	0,00035	5,0
0,55	71	1LA7 073-2AA	2800	71	70	0,82	1,36	1,9	2,5	4,3	2,6	16	1	0,00045	6,6
0,75	80	1LA7 080-2AA	2855	73	72	0,86	1,73	2,5	2,3	5,6	2,4	16	1	0,00085	8,2
1,1	80	1LA7 083-2AA	2845	77	77	0,87	2,40	3,7	2,6	6,1	2,7	16	1	0,0011	9,9
1,5	90S	1LA7 090-2AA	2860	79	80	0,85	3,25	5,0	2,4	5,5	2,7	16	2	0,0015	12,9
2,2	90L	1LA7 096-2AA	2880	82	82	0,85	4,55	7,3	2,8	6,3	3,1	16	2	0,0020	15,7
3	100L	1LA7 106-2AA	2890	84	84	0,85	6,10	9,9	2,8	6,8	3,0	16	2	0,0038	21,5
4	112M	1LA7 113-2AA	2905	86	86	0,86	7,80	13,1	2,6	7,2	2,9	16	2	0,0055	29,0
5,5	132S	1LA7 130-2AA	2925	86,5	86,5	0,89	10,3	18	2,0	5,9	2,8	16	2	0,016	40,5
7,5	132S	1LA7 131-2AA	2930	88	88	0,89	13,8	24,4	2,3	6,9	3,0	16	2	0,021	48,5
11	160M	1LA7 163-2AA	2940	89,5	89,5	0,88	20,0	36	2,1	6,5	2,9	16	2	0,034	68,5
15	160M	1LA7 164-2AA	2940	90	90,2	0,90	26,5	49	2,2	6,6	3,0	16	2	0,040	76,5
18,5	160L	1LA7 166-2AA	2940	91	91,2	0,91	32,5	60	2,4	7,0	3,1	16	2	0,052	87

Konstrukce



- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.
6. .



Konstrukce

1. Kostra motoru

- * litina nebo hliník (malé motory)
- * není součástí magnetického obvodu
- * žebra umožňují lepší odvod tepla

2. Ložiska

- * valivá (kuličková) ložiska
- * provedení ložiska je dáno provozem motoru (axiální a radiální namáhání)
- * životnost ložiska je podle druhu provozu 20 000 – 40 000 hodin
- * požadavky na domazávání jsou dány výrobcem

3. Ventilátor

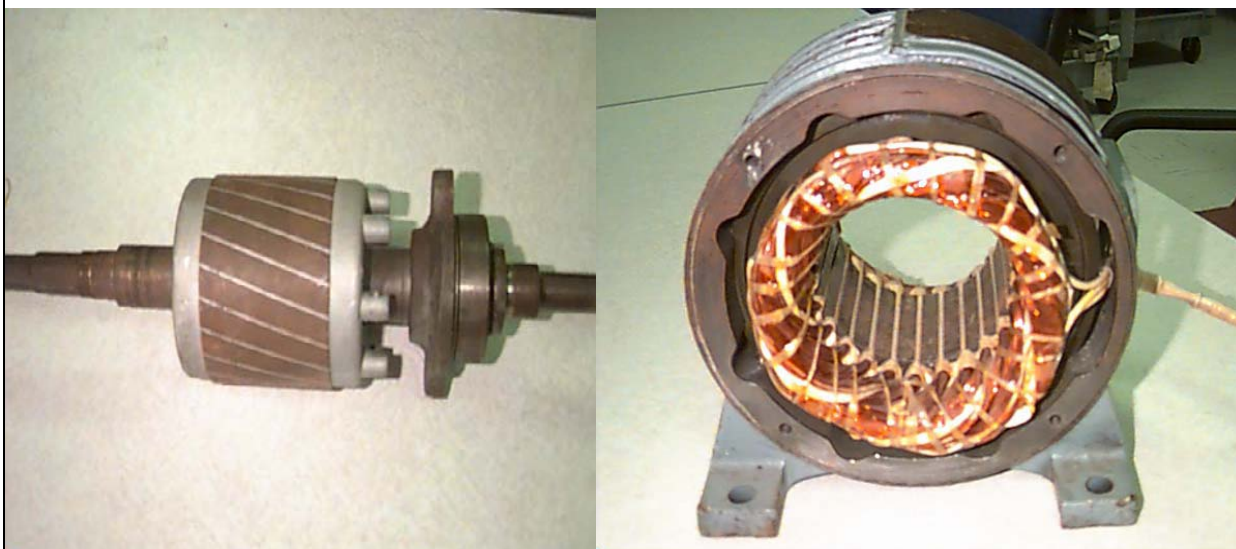
- * plastový, způsob chlazení je dán výrobcem

Magnetický obvod statoru a rotoru

- * používají se plechy válcované za studena (dynamové plechy) s obsahem křemíku 3% a tloušťky 0,5 mm.
- * plechy jsou izolované lakem
- * do plechu jsou vylisovány drážky pro vinutí a pro stažení a upevnění svazku
- * jednotlivé plechy jsou staženy do statorového svazku
- * statorový svazek je připevněn na kostru, rotorový svazek je nalisován na rotor
- * mezi magnetickým obvodem statoru a rotoru je vzduchová mezera. Měla by být co nejmenší a její velikost je dána technologickými možnostmi (do 1 mm).

K1

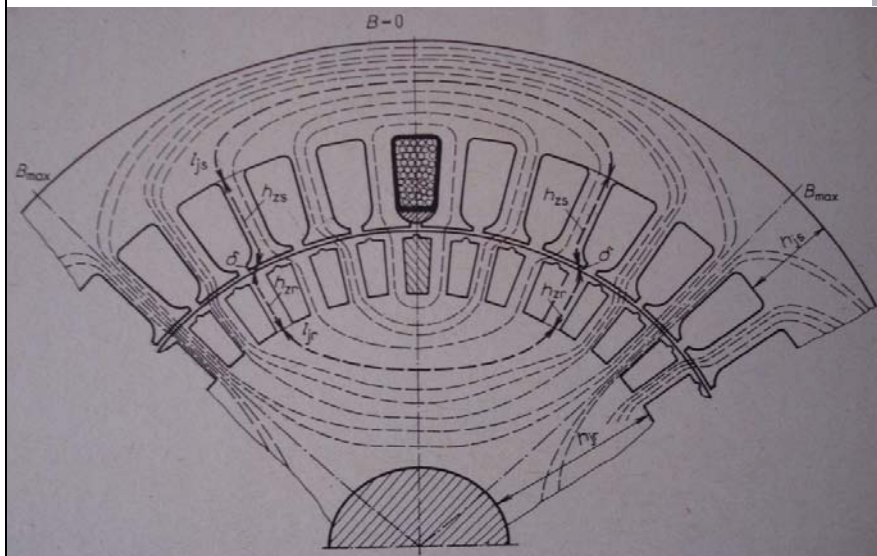
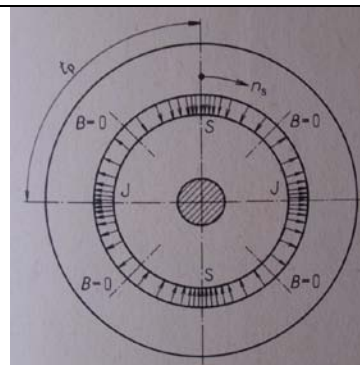
Magnetický obvod statoru a rotoru



Magnetický obvod

Kdyby stator a rotor měly úplně hladký povrch a vodiče byly po povrchu rozloženy spojitě byly by indukční čáry rozloženy přesně podle sinusovky a otáčely by se synchronními otáčkami.

τ_p – pólová rozteč – vzdálenost os dvou sousedních pólů



Popište kudy prochází střední indukční čára

Předpokládáme, že všechny indukční čáry prochází jen zuby a ne drážkami, které mají podstatně větší magnetický odpor

Vinutí

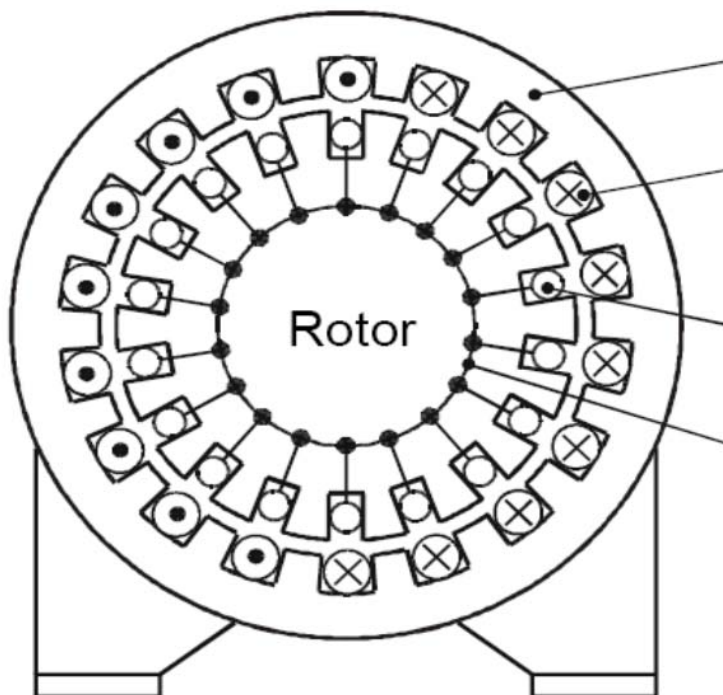
1. Vinutí statoru

- * jednotlivé cívky vinutí (měď) jsou rovnoměrně rozloženy po obvodu statorového svazku magnetického obvodu
- * cívky jsou uloženy izolovaně do drážek magnetického obvodu
- * po založení se konce cívek daných fází vzájemně propojí
- * způsob propojení a rozložení fází je dán požadovaným počtem pólů (otáčkami) motoru
- * po propojení a izolování jednotlivých fází je vinutí impregnováno

2. Vinutí rotoru (motor s kotvou nakrátko)

- * na rotoru je klecové vinutí
- * do drážek rotoru je pod tlakem odlitá hliníková nebo měděná klec
- * čela klecového vinutí mají výstupky pro lepší odvod tepla

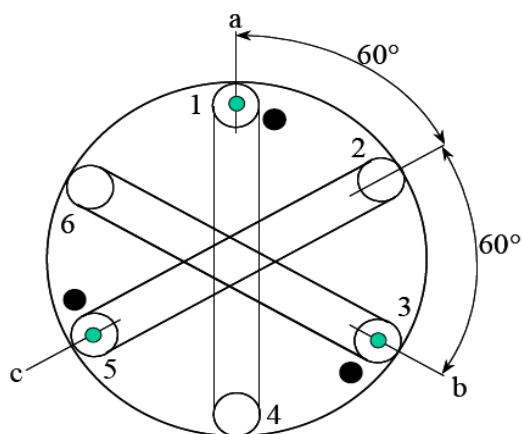
Vinutí



05007a/Can.

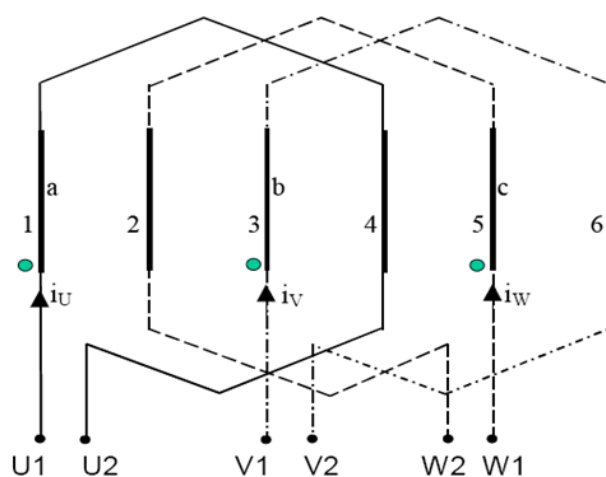
K1

Vinutí

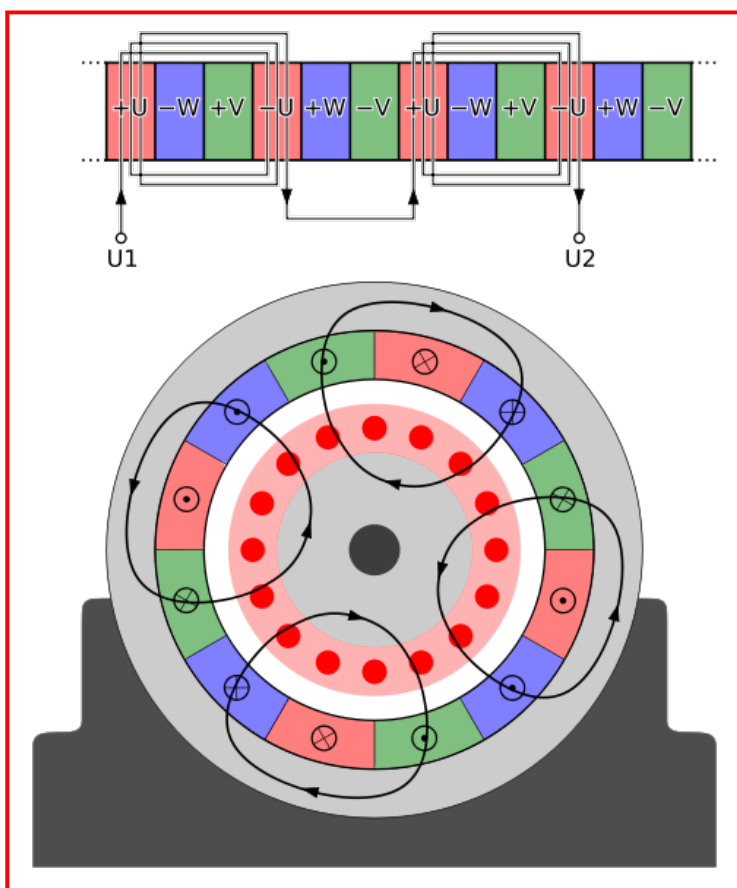


uspořádání cívek na
obvodu statoru

rozložení cívek v drážkách
magnetického obvodu
statoru

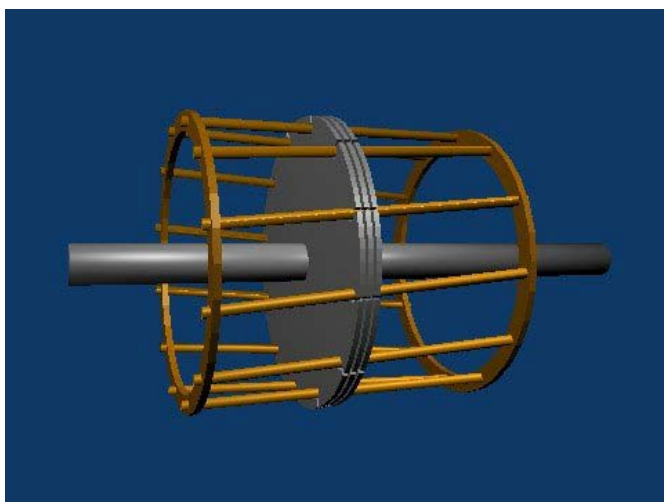


K1

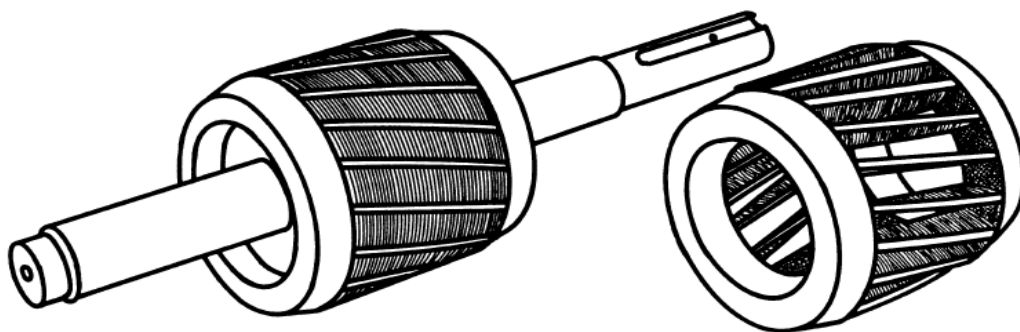


Kolika pólový stroj je na obrázku ?

Jaká je pólová rozteč?



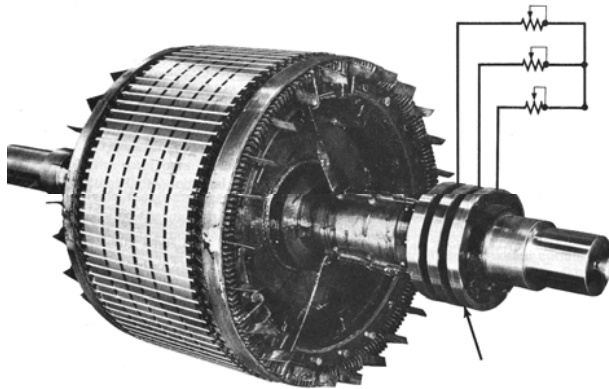
Drážky a tyče jsou zešikmeny z důvodů snížení hlučnosti vlivu vyšších harmonických



Kroužkový asynchronní motor

Vinutý rotor:

- Trojfázové rotorové vinutí je uloženo v rotorových drážkách.
- Je zapojen zpravidla do hvězdy (Y), zřídka do trojúhelníka (D)
- Konce fází rotoru jsou vyvedeny na kroužky, začátky do uzlu (Y)
- Tři uhlíkové kartáče dosedají na tři kroužky
- Rotorové vinutí může být spojeno s externími variabilními rezistory nebo se samostatným zdrojem (měničem)

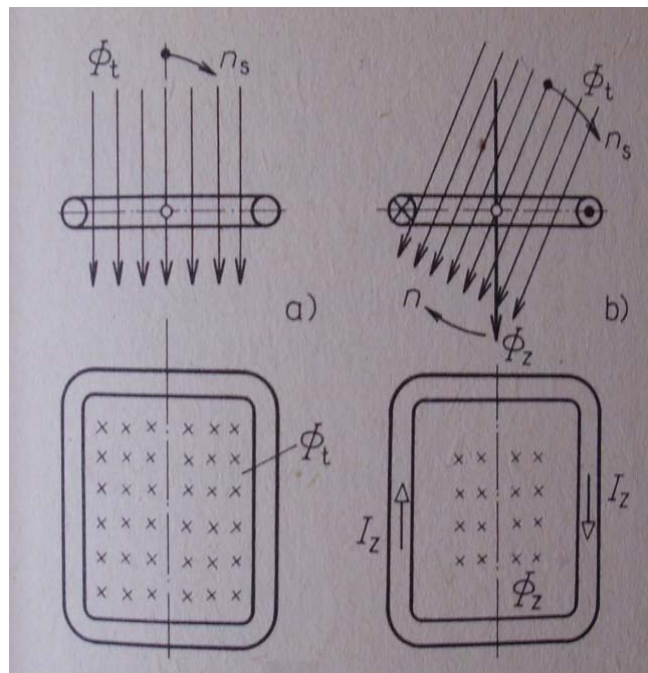


K1

Vznik tažné síly

Předpokládejme 1 závit spojený nakrátko. Velikost mag. toku procházejícího plochou závitu se během otáčení točivého mag. pole mění. Změnou se indukuje napětí, které jím protlačí značný proud. Ten vybudí své magnetické pole, které spolu s točivým polem statoru vytvoří točivý moment.

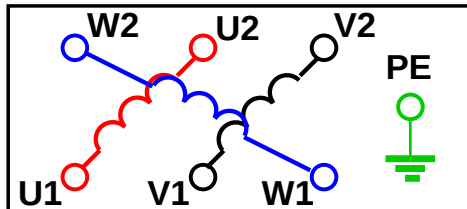
Indukční motor se roztočí sám



Může se rotor otáčet synchronní rychlostí ??

Svorkovnice (běžný motor)

zapojení vinutí
na svorkovnici



Napěťový údaj na štítku běžného motoru (pro jednu frekvenci):

a) 230/400 V

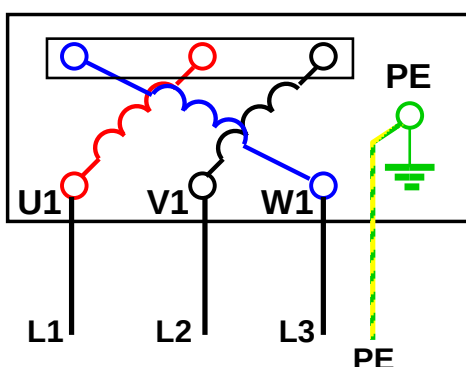
b) 400/690 V

Vyšší napětí platí vždy pro zapojení vinutí do hvězdy !

Běžné motory mají na svorkovnici uvedeny pro jednu frekvenci dvě napětí $\Rightarrow$ motor lze při stejném výkonu (ale různých proudech) připojit na dvě různá síťová napětí.

Hlavní význam je dnes ale v dalších možnostech použití pohonu.

Údaj na štítku 230/400 V, běžná síť $U = 400$ V



Vinutí motoru se zapojí
do hvězdy nebo do
trojúhelníku ?

Vinutí motoru musí být
zapojeno do hvězdy

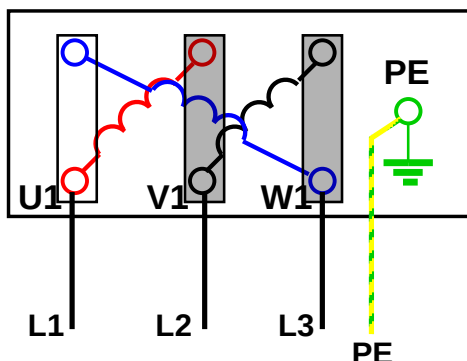
Na jaké napětí musí být dimenzována
cívka jedné fáze ?

Na fázové napětí 230 V

Jaké je nebezpečí při zapojení vinutí
do trojúhelníku ?

Při správném jištění zapůsobí jistič,
jinak hrozí poškození vinutí !

Údaj na štítku 400/690 V, běžná síť U = 400 V



Vinutí motoru se zapojí
do hvězdy nebo do
trojúhelníku ?

Vinutí motoru musí být
zapojeno do trojúhelníku

Na jaké napětí musí být dimenzována
cívka jedné fáze ?

Na sdružené napětí 400 V

Jaké je nebezpečí při zapojení vinutí
do hvězdy ?

Motor pracuje s menším výkonem, při
plné zátěži naroste proud.

Při správném jištění zapůsobí jistič,
jinak dojde k tepelnému poškození
vinutí !

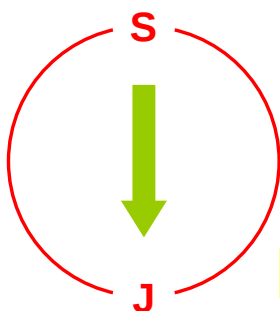
Svorkovnice (běžný motor)

Hlavní význam dvou hodnot napětí na svorkovnici:

- a) 230/400 V - umožňuje připojit trojfázový motor do jednofázové soustavy (při zapojení vinutí do trojúhelníku pracuje motor s 70% výkonem).
- b) 400/690 V - umožňuje použít pro spouštění přepínač hvězda – trojúhelník, záběrový proud klesne na $1/3 I_n$.

Počet pólů motoru

- * základním prvkem pro vinutí je cívka
- * každá fáze je tvořena několika cívkami, které jsou vzájemně propojeny do série
- * při průchodu proudu je cívka elektromagnet, mezi jehož póly se vytváří magnetické pole
- * vzájemná pozice (úhel) severního a jižního pólu se nazývá pólová rozteč (t_p).
- * pólová rozteč určuje počet pólů motoru ($2p$) a tím i otáčky motoru



t_p udává se elektricky a geometricky.

t_p elektricky -

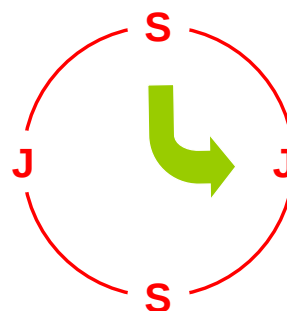
t_p geometricky -

kde p – počet pólových dvojic

$$t_{p\text{ geo}} = t_{p\text{ ele}}/p$$

$$t_p = 180^\circ_{\text{ele}} = 180^\circ_{\text{geo}} \Rightarrow$$

$$t_p = 180^\circ_{\text{ele}} = 90^\circ_{\text{geo}} \Rightarrow$$

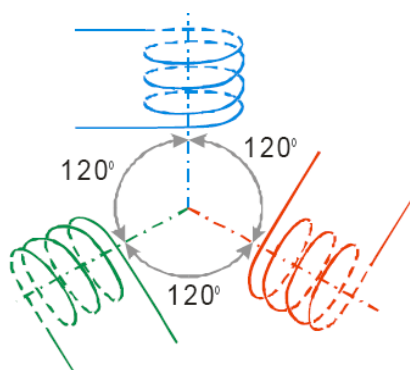


Točivé magnetické pole

Magnetické pole může být:

- * pulsující
 - je vytvořeno jednofázovým proudem.
 - K roztočení motoru nestačí, k chodu ano.
 - využití
 - chod jednofázového motoru
- * točivé kruhové
 - je vytvořeno trojfázovým proudem nebo při fázovém posunu dvou stejných proudů o 90°
 - využití
 - trojfázové střídavé motory
- * točivé eliptické
 - je vytvořeno dvěma fázově posunutými proudy
 - využití
 - rozběh jednofázového motoru, motor se stíněným pólem
- * točivé postupné
 - výsledný fázor indukčního toku se nepohybuje plynule, ale po krocích (úhlech).
 - využití
 - elektronické napájení střídavých a speciálních stejnosměrných motorů

Točivé magnetické pole

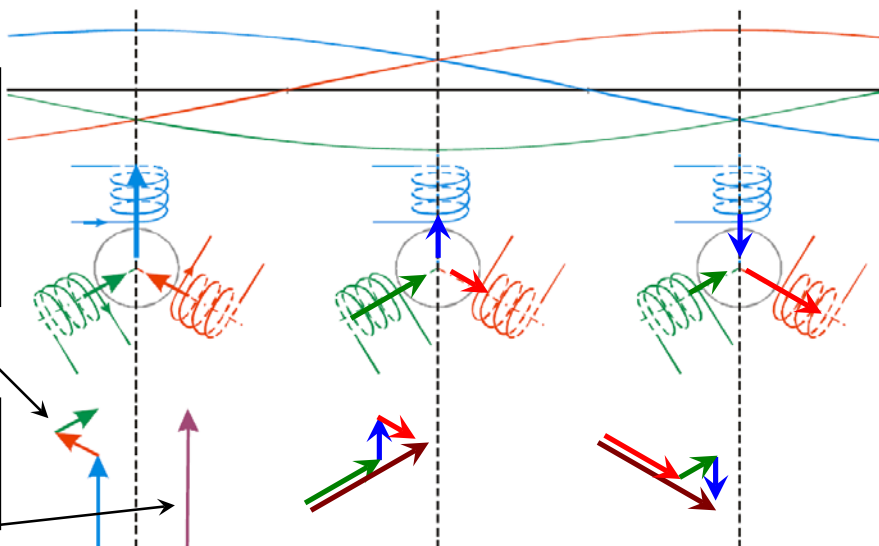


Dílčí toky
jednotlivých fází
v daném okamžiku

$$\begin{aligned}\phi_1 &= +\phi_{\max} \\ \phi_2 &= -\frac{1}{2}\phi_{\max} \\ \phi_3 &= -\frac{1}{2}\phi_{\max}\end{aligned}$$

Výsledný tok
Jaká je hodnota ϕ ?

$$\phi_c = \frac{3}{2}\phi_{1\max}$$

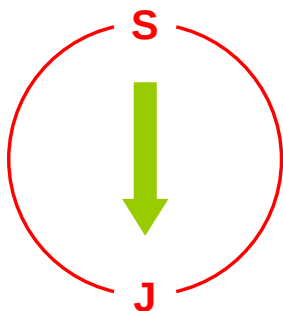


Točivé magnetické pole

Na čem závisí rychlost otáčení magnetického pole ?

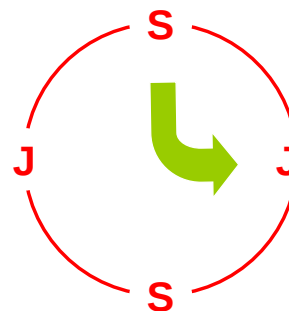
- * na frekvenci - čím vyšší frekvence, tím bude otáčení rychlejší
- * na počtu pólů - čím více pólových dvojic, tím je rychlost pomalejší (póly jsou od sebe méně vzdáleny, za stejnou dobu oběhne pole menší vzdálenost) .
pro $p = 1$ oběhne pole za 1 periodu proudu 360°
pro $p = 2$ oběhne pole za 1 periodu proudu pouze 180°

Vyjádření rychlosti magnetického pole – synchronní rychlost n_s (1/min)



Proč je ve vztahu 60 ?

Jaká je maximální rychlost
točivého pole (a tím i motoru)
na síťové frekvenci ?



Základní vztahy a pojmy

1. Indukované napětí

- * výpočet indukovaného napětí v jedné cívce je stejný jako u transformátoru
- * výsledné indukované napětí je dáno vektorovým součtem dílčích napětí v daném čase
- * protože jsou jednotlivé cívky vůči sobě natočeny, nejsou jednotlivá napětí ve fázi a výsledné napětí je nižší než u transformátoru

Efektivní hodnota indukovaného napětí jedné cívky:

kde	N_s ...	počet závitů jedné cívky
	ϕ ...	maximální indukční tok
	f_1 ...	frekvence na statoru
	k_v ...	činitel vinutí, $k_v < 1$

2. Tažná síla

- * ve vinutí statoru vzniká točivé magnetické pole $\Rightarrow ?$
- * pole protne klecové vinutí rotoru $\Rightarrow ?$
- * v rotoru se indukuje napětí a začne procházet proud $\Rightarrow ?$
- * proud v rotoru vytvoří vlastní tok (magnetické pole) $\Rightarrow ?$
- * magnetické pole rotoru se snaží snížit rozdíl mezi oběma toky a začne se otáčet (spolu s rotorem) ve směru hlavního točivého pole
- * v ideální případě by se rotor roztočil na synchronní otáčky $n_s \Rightarrow ?$
- * při stejné rychlosti točivého pole a rotoru se v rotoru přestane indukovat napětí a pole rotoru zanikne $\Rightarrow ?$
- * rotor se bude otáčet vlastní setrvačností
- * ve skutečnosti rychlost rotoru vlivem ztrát nedosáhne synchronní rychlosti, rychlost rotoru je menší než rychlost pole
- * zatížení rotoru poklesne rychlost rotoru $\Rightarrow ?$
- * zvýší se indukované napětí a indukovaný proud $\Rightarrow ?$
- * zvětší se magnetické pole rotoru a vznikne tažná síla
- * pokles otáček při zatížení vyjadřuje skluz – s (-) nebo (%)

3. Skluz - s (-) nebo (%)

je poměrný rozdíl rychlosti magnetického pole statoru a otáček rotoru:

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

V jakém rozsahu se pohybuje skluz pro motor ?

$$0 \leq s \leq 1$$

Jak je velký skluz u indukčních motorů ?

motory naprázdno $s \Rightarrow 0$

malé motory $s = (6 - 10) \%$

motory středních výkonů $s \cong 4 \%$

motory velkých výkonů $s = (1 - 2) \%$

Čím je skluz způsoben ?

- * mechanické ztráty motoru (ventilátor, ložiska) - malý vliv
- * odpor v rotoru – u motoru s kotvou nakrátko - minimální vliv
- * zátěží

4. Otáčky motoru - n (ot./min)

Otáčky motoru lze vyjádřit ze synchronních otáček a ze skluzu ?

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

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

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

Ze vztahu se odvozují možnosti regulace otáček indukčního motoru:

- * změnou frekvence - spojitá a bezetrátová regulace
- * změnou počtu pólů - nespojitá a bezetrátová regulace
- * změnou skluzu - spojitá a podle realizace ztrátová (odporem) nebo bezetrátová regulace (kaskáda)

Nejčastěji se dnes využívají první dva způsoby regulace otáček.

Příklady

1. Vypočítejte pólovou rozteč pro šestipólový motor ($t_{pele} = ?$, $t_{pgeo} = ?$)

2. Vypočítejte synchronní otáčky pro dvanáctipólový motor při síťovém kmitočtu ($n = ?$)

3. Vypočítejte otáčky čtyřpólového motoru při frekvenci 60 Hz, je-li skluz 4% ($n = ?$)

4. Vypočítejte skluz, jsou-li otáčky při síťové frekvenci 960 ot./min ($s = ?$)

Příklady

Třífázový AM 14,7 kW, 3x230V, 50Hz, šestipólový, zapojený do Y, má jmenovitý skluz 5%.

Vypočtete:

- a) Synchronní otáčky a synchronní rychlost
- b) Jmenovité otáčky rotoru
- c) Jmenovitý moment motoru
- d) Frekvenci rotorového proudu

Řešení :

a) Synchronní otáčky :

synchronní úhlová rychlost :

b) Otáčky rotoru:

úhlová rychlost rotoru:

c) Jmenovitý moment motoru:

d) Frekvence rotorového proudu:

Provozní stavy indukčního motoru

Provozní stavy motoru jsou obdobné jako u transformátoru $\Rightarrow$?

- * stav naprázdno
- * stav nakrátko
- * stav při zatížení

Princip motoru a transformátoru je stejný (elektromagnetická indukce) a také vyhodnocení provozních stavů bude obdobné.

V čem jsou hlavní rozdíly mezi motorem a transformátorem, které se projeví analýze ?

- * magnetický obvod motoru má mezi statorem a rotorem vzduchovou mezeru, jejíž minimální velikost je dána technologickými možnostmi $\Rightarrow$ zvýší se magnetizační proud (i proud naprázdno), zhorší se účinnost naprázdno
- * na motor připojujeme mechanickou zátěž, která odpovídá činné zátěži u transformátoru.
- * frekvence v rotoru závisí na skluzu a není konstantní $\Rightarrow$ komplikace při kreslení fázorového diagramu

K1

Chod naprázdno

Co znamená chod naprázdno u motoru ?

Na hřídel není připojena žádná zátěž (volný konec hřídele)

Předpoklady pro rozbor:

- * rotor se otáčí synchronní rychlostí (skluz je zanedbatelný) $\Rightarrow$?
 - * na rotoru se neindukuje žádné napětí, neprotéká proud, nevznikají ztráty v železe ani ve vinutí $\Rightarrow$?
 - * v náhradním schématu se vliv rotoru neprojevují
 - * na rozdíl od transformátoru je $\Rightarrow$?
1. v důsledku vzduchové mezery větší magnetizační proud
 2. činná složka proudu je větší v důsledku mechanických ztrát - ΔP_m
- $\Rightarrow$ zvýší se proud naprázdno
- $\Rightarrow$ podélné prvky obvodu statoru nelze zanedbat

Indukční motor naprázdno

Vyjádřete podle 2. KZ vstupní část obvodu $\Rightarrow$?

$$U_1 = R_{v1} \cdot I_1 + jX_{\sigma 1} \cdot I_1 + U_i$$

Vyjádřete podle 1 KZ poměry v uzlu $\Rightarrow$?

$$I_0 = I_{FE} + I_{\mu}$$

Jak je velké napětí a proud na rotorovém vinutí ?

$$U_{i20} = 0, U_{20} = 0, I_2 = 0$$

K1

Ztráty naprázdno - ΔP_0

Jaké jsou složky ztrát naprázdno ?

ΔP_{Fe} - ztráty v magnetickém obvodu statoru (ztráty v rotoru zanedbány)

ΔP_{j10} - ztráty ve vinutí statoru (ztráty ve vinutí rotoru zanedbáváme)

ΔP_m - mechanické ztráty

$$\Delta P_0 = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{j10} + \Delta P_m$$

Rozbor parametrů

1. Proud naprázdno – I_0

V důsledku vzduchové mezery (nárůst magnetizačního proudu) a mechanických ztrát je vyšší než u transformátoru. Podle velikosti motoru se pohybuje v rozsahu - $I_0 = (20 - 60)\% I_n$

2. Účinník naprázdno – $\cos \varphi_0$

V důsledku nárůstu magnetizačního proudu je nižší než u transformátoru (zejména u starších motorů) - $\cos \varphi_0 = (0,1 - 0,3) \Rightarrow$ motory by neměly běžet naprázdno.

Indukční motor nakrátko

Jak definujeme chod nakrátko indukčního motoru ?

Motor je zabrzděn, vinutím motoru prochází proud nakrátko, který je mnohem větší než proud naprázdno $\Rightarrow$ příčné složky lze zanedbat.

Náhradní zatěžovací odpor (analogie se zatíženým transformátorem) je nulový (výstupní svorky v náhradním schématu jsou zkratovány).

Indukční motor nakrátko

Lze měřit přímo indukční motor nakrátko ?

Měříme při sníženém napětí – napětí nakrátko U_k .

Je to napětí, při kterém prochází motorem jmenovitý proud.

Rozbor indukčního motoru nakrátko

Může se u motoru objevit stav nakrátko ?

Na rozdíl od transformátoru ano:

1. Při spouštění – v prvním okamžiku je na vinutí plné napětí, ale rotor se netočí – krátkodobý režim.
2. Při brzdění protiproudem – točivé magnetické pole se otáčí proti rotoru
3. Reverzace – v okamžiku změny pořadí fází se točivé magnetické pole otáčí proti rotoru – krátkodobý režim.

1. Impedance nakrátko - $\underline{Z}_k (\Omega)$

Rozbor indukčního motoru nakrátko

2. Proud nakrátko motoru (záběrový proud) - $\underline{I}_z$

Čím je dána jeho velikost ?

impedancí indukčního motoru $\underline{Z}_k$ a napětím sítě $\underline{U}_n$ (nemusí to být jmenovité napětí motoru).

Při výpočtu předpokládáme lineární závislost napětí a proudu.

Velikost proudu nakrátko (záběrového proudu) $\underline{I}_z = (4-7)\underline{I}_n$

1. způsob →

2. způsob →

přesný výpočet z
měření nakrátko →

Rozbor indukčního motoru nakrátko

3. Účinník nakrátko - $\cos \varphi_k$

jeho velikost je dána podílem činné a jalové složky impedance indukčního motoru Z_k ($\cos \varphi_k = R_k/Z_k$)

Vlivem vzduchové mezery (větší rozptyl) je účinník nakrátko výrazně menší než u transformátorů (u motorů středních výkonů 0,3 - 0,5).

4. Ztráty nakrátko (ztráty ve vinutí) - $\Delta P_k = \Delta P_i$

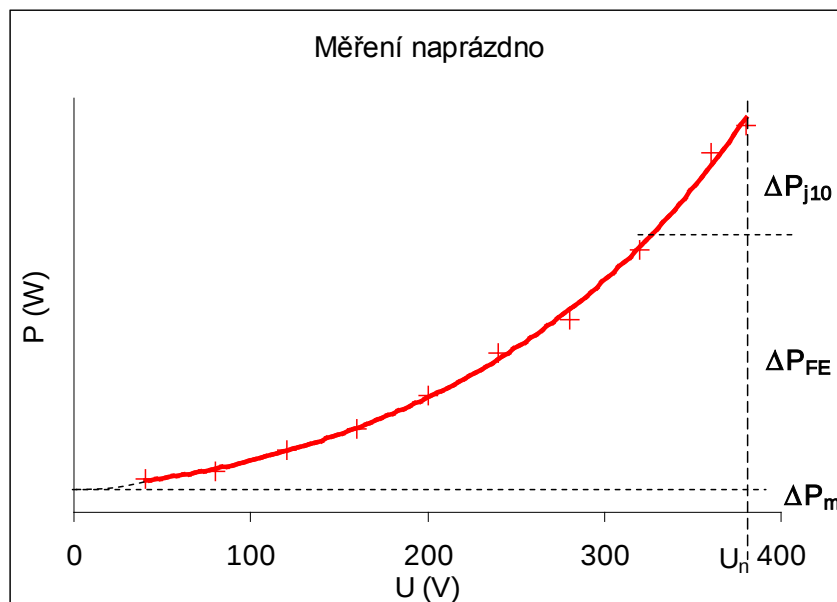
jsou dány proudem a odporem vinutí.

Ztráty lze vyjádřit obecně pomocí Jouleova zákona $\Rightarrow$

Pro motor platí:

Ztráty nakrátko lze určit měřením (wattmetr) nebo výpočtem

Vyhodnocení měření naprázdno

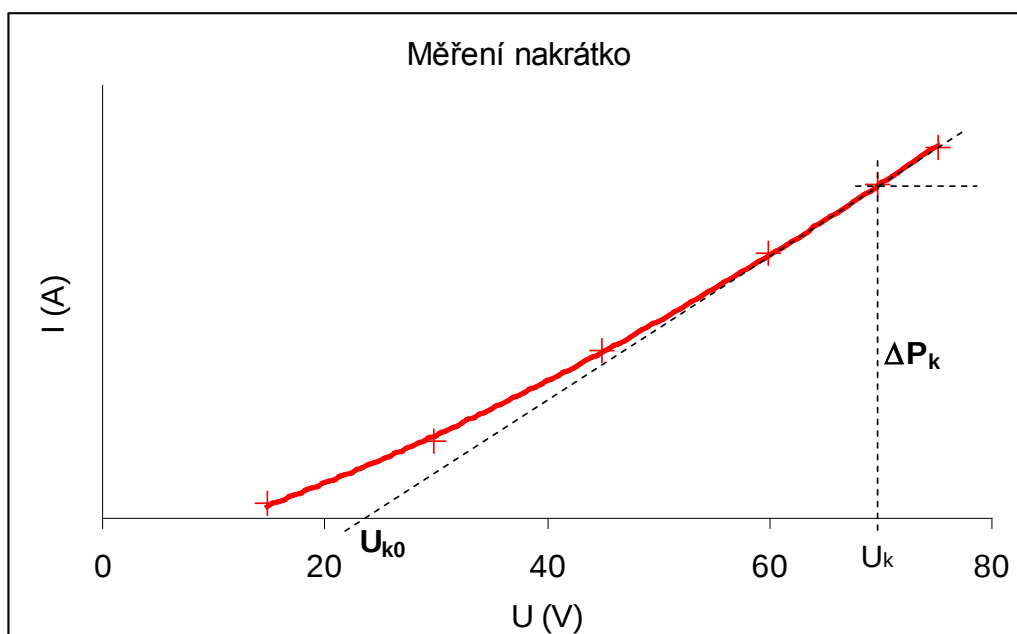


ΔP_m - protažení křivky na osu výkonu a průsečík s osou výkonu

ΔP_{j10} - ztráty naprázdno ve vinutí statoru (ve vinutí rotoru lze ztráty zanedbat). $\Delta P_{j10} = 3 \cdot R_{1v} \cdot I_{on}^2$

ΔP_{FE} - ztráty v magnetickém obvodu statoru, $\Delta P_{FE} = \Delta P_0 - \Delta P_m - \Delta P_{j10}$

Vyhodnocení měření naprázdno



U_{k0} - tečna ke křivce a průsečík s osou napětí
 ΔP_k - ztráty nakrátko ve vinutí motoru, $\Delta P_k = 3 \cdot R_k \cdot I_z^2$ (ztráty v železe jsou zanedbány).

Výpočet parametrů indukčního stroje

1. Podélné parametry - R_k , X_k

Vstupní hodnoty pro výpočet:

a) výpočet účinníku nakrátko



b) výpočet impedance nakrátko



c) výpočet podélných parametrů



Výpočet parametrů indukčního stroje

Příklad:

Vypočítejte podélné parametry indukčního motoru s výkonem 4kW, napětím nakrátko 117,3 V, jmenovitým napětím 380 V, jmenovitým proudem 9,1 A a ztrátami nakrátko 640W.

a) výpočet účinníku nakrátko

b) výpočet impedance nakrátko

c) výpočet podélných parametrů

Výpočet parametrů indukčního stroje

2. Příčné parametry - R_{FE} , X_m

Vstupní hodnoty pro výpočet:

a) výpočet účinníku naprázdno



b) výpočet činné a jalové složky proudu naprázdno



c) zápis proudu naprázdno v komplexním tvaru



d) výpočet úbytku napětí
na podélné impedanci
statorového vinutí



e) výpočet indukovaného napětí



f) výpočet příčné admitance



g) výpočet příčných parametrů



Výpočet parametrů indukčního stroje

Příklad:

Vypočítejte podélné parametry indukčního motoru s výkonem 4kW, napětím nakrátko 117,3 V, jmenovitým napětím 380 V, jmenovitým proudem 9,1 A a výkonem nakrátko 640W. Proud naprázdno je 4,46 A, výkon naprázdno je 280W

a) podélné parametry (předchozí příklad)

$R_k = 2,58 \Omega$
 $X_k = 7 \Omega$

b) výpočet účinníku naprázdno

c) výpočet činné a jalové složky
proudu naprázdno

d) zápis proudu naprázdno v komplexním
tvaru

e) výpočet úbytku napětí
na podélné impedanci
statorového vinutí

f) výpočet indukovaného
napětí

g) výpočet příčné
admittance

h) výpočet příčných
parametrů

Indukční motor při zatížení

Základní princip indukčního motoru a transformátoru je stejný $\Rightarrow$ základní shoda je jak v náhradním schématu, tak i ve fázorovém diagramu. Přesto budou určité odlišnosti: ?

1. Na výstupní vinutí transformátoru jsme mohli připojit různou elektrickou zátěž (velikost a charakter). Na motor lze připojit pouze mechanickou zátěž, která má analogii s odporovou (činnou) zátěží transformátoru.
2. Na vstupním a výstupním vinutí transformátoru je vždy stejná frekvence. U motoru je na statorovém vinutí frekvence zdroje, na rotorovém vinutí je frekvence závislá na skluzu $\Rightarrow$ frekvence na vinutí rotoru je proměnná.

Vliv na rozbor:

1. Na výstupu v náhradním schématu je vždy činný odpor, který je proměnný podle velikosti zátěže.
2. Do fázorového diagramu lze zakreslit pouze fázory se stejnou frekvencí $\Rightarrow$ je nutné provést korekci jednotlivých veličin tak, aby nebyly závislé na frekvenci.

Indukční motor při zatížení

Základní princip indukčního motoru a transformátoru je stejný $\Rightarrow$ základní shoda je jak v náhradním schématu, tak i ve fázorovém diagramu. Přesto budou určité odlišnosti: ?

1. Na výstupní vinutí transformátoru jsme mohli připojit různou elektrickou zátěž (velikost a charakter). Na motor lze připojit pouze mechanickou zátěž, která má analogii s odporovou (činnou) zátěží transformátoru.
2. Na vstupním a výstupním vinutí transformátoru je vždy stejná frekvence. U motoru je na satorovém vinutí frekvence zdroje, na rotorovém vinutí je frekvence závislá na skluzu $\Rightarrow$ frekvence na vinutí rotoru je proměnná.

Vliv na rozbor:

1. Na výstupu v náhradním schématu je vždy činný odpor, který je proměnný podle velikosti zátěže.
2. Do fázorového diagramu lze zakreslit pouze fázory se stejnou frekvencí $\Rightarrow$ je nutné provést korekci jednotlivých veličin tak, aby nebyly závislé na frekvenci.

Frekvence na rotoru

Se změnou zátěže se mění skluz $\Rightarrow$ změna frekvence na rotoru:

a) pro $n = 0 \Rightarrow ?$

$s = 1$ (stav nakrátko) $\Rightarrow$ vinutí rotoru je protínáno magnetickým polem o frekvenci sítě $\Rightarrow \underline{f_2 = f_1}$

b) pro $n = n_s \Rightarrow ?$

$s = 0$ (stav naprázdno) $\Rightarrow$ rotor se otáčí stejnou rychlostí jako magnetické pole statoru $\Rightarrow$ vzájemný rozdíl rychlosti je nulový $\Rightarrow$ na rotoru se neindukuje žádné napětí $\underline{f_2 = 0}$

c) $0 < n < n_s \Rightarrow ?$

Frekvence v rotoru je dána rozdílem synchronních a skutečných otáček motoru

Indukované napětí na rotoru

Obecné vyjádření velikost indukovaného napětí na cívce: ?

Indukované napětí na vinutí statoru: ?

frekvence na statoru je dána sítí a nezávisí na zátěži $\Rightarrow$ stejné jako u transformátoru.

Indukované napětí na vinutí rotoru: ?

frekvence na rotoru závisí na zátěži $\Rightarrow$ do fázorového diagramu nelze kreslit fázory s proměnnou frekvencí.

Protože lze zátěž vyjádřit prostřednictvím skluzu, převedeme všechny veličiny v rotoru, které obsahují frekvenci, na závislost na skluzu a později dále upravíme.

K1

Rozptylová reaktance rotoru

Obecné vyjádření reaktance na cívce: ?

Rozptylová reaktance na vinutí statoru: ?

frekvence na statoru je dána sítí a nezávisí na zátěži $\Rightarrow$ stejné jako u transformátoru.

Rozptylová reaktance na vinutí rotoru: ?

frekvence na rotoru závisí na zátěži $\Rightarrow$ do fázorového diagramu nelze kreslit fázory s proměnnou frekvencí.

Proto opět vyjádříme zátěž prostřednictvím skluzu

Proud na rotoru

Z pohledu parametrů je proud na rotoru tvořen RL zátěží (odpor vinutí + rozptylová reaktance): ?

Po dosazení: ?

$$I_2 = \frac{U_{i20} * s}{R_2 + jX_{\sigma 2} * s}$$

$$I_2 = \frac{U_{i2}}{R_2 + jX_{\sigma 2s}}$$

Čitatel i jmenovatel vydělíme skluzem: ?

$$I_2 = \frac{U_{i20}}{\frac{R_2}{s} + jX_{\sigma 2}}$$

Co zahrnuje člen R_2/s : ?

musí obsahovat odpor vinutí rotoru (R_2) a zátěž

Z členu R_2/s odečteme odpor vinutí rotoru R_2 a dostaneme vyjádření zátěže motoru do náhradního schématu: ?

Zjednodušené náhradní schéma

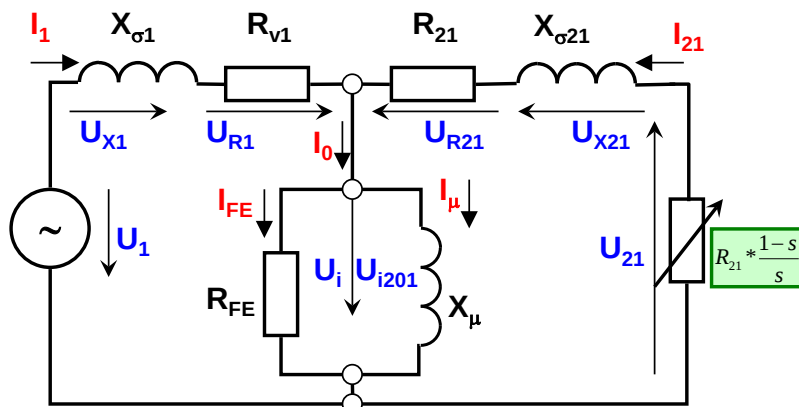
Pro podrobný rozbor provozních stavů a parametrů, výpočtu proudů, výkonů a momentů se využívá zjednodušené náhradní schéma.

Pak platí: $U_1 = U_i = U_{i201} \Rightarrow$

$$I_{21} = \frac{U_1}{Z}$$

$$Z = \left(R_{v1} + \frac{R_{21}}{s}\right) + j(X_{\sigma 1} + X_{\sigma 21})$$

Indukční motor při zatížení



$$\begin{aligned}
 U_{X1} &= jX_{\sigma 1} \cdot I_1 & U_{R1} &= R_{v1} \cdot I_1 \\
 U_1 &= U_i + U_{X1} + U_{R1} \\
 I_{FE} &= U_i / R_{FE} & I_{\mu} &= U_i / (jX_{\mu}) \\
 I_0 &= I_{FE} + I_{\mu} & I_0 &= I_1 + I_{21} \\
 U_{21} + U_{X21} + U_{R21} + U_{i201} &= 0 \Rightarrow \\
 -U_{i201} &= U_{21} + U_{X21} + U_{R21}
 \end{aligned}$$

K1

Přepočet veličin

$$I_{21} = I_2 \cdot \frac{m_2 \cdot N_2 \cdot k_{v2}}{m_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}}$$

$$U_{i201} = U_{i20} \cdot \frac{m_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}}{m_2 \cdot N_2 \cdot k_{v2}}$$

$$R_{21} = R_2 \cdot \frac{m_1}{m_2} \cdot \left(\frac{N_1 \cdot k_{v1}}{N_2 \cdot k_{v2}} \right)^2$$

$$X_{\sigma 21} = X_{\sigma 2} \cdot \frac{m_1}{m_2} \cdot \left(\frac{N_1 \cdot k_{v1}}{N_2 \cdot k_{v2}} \right)^2$$

Platí, že

$U_{i201} = U_{i20} \cdot p$
přepočtené rotorové indukované napětí
stator

$R_{21} = R_2 \cdot p^2$
přepočtený rotorový odpor na stator

$X_{\sigma 21} = X_{\sigma 2} \cdot p^2$
přepočtená rotorová rozptylová reaktance
na stator

$I_{21} = I_2 / p$
rotorový proud přepočtený na stator

Kde převod

$$p = \frac{U_i}{U_{i20}} = \frac{4.44 \cdot \Phi \cdot f \cdot m_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}}{4.44 \cdot \Phi \cdot f \cdot m_2 \cdot N_2 \cdot k_{v2}} = \frac{m_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}}{m_2 \cdot N_2 \cdot k_{v2}}$$

Moment indukčního motoru

Točivý moment na hřídeli platí:

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}} = 9,55 \cdot \frac{P}{n} (N \cdot m)$$

kde P ... mechanický výkon motoru
n ... otáčky motoru, $n = n_s \cdot (1 - s)$

Z náhradního schématu lze určit vztah pro výkon motoru:

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

Po dosazení je moment motoru:

$$M = 9,55 \frac{P}{n} = 9,55 \cdot \frac{3 \cdot I_{21}^2 \cdot R_{21} \cdot \frac{1-s}{s}}{n_s \cdot (1-s)} = 9,55 \cdot \frac{3 \cdot I_{21}^2 \cdot R_{21} (1-s)}{s \cdot n_s \cdot (1-s)} = 9,55 \cdot \frac{3 \cdot I_{21}^2 \cdot R_{21}}{s \cdot n_s}$$

Momentová charakteristika

patří mezi základní provozní charakteristiky motoru:

Momentová charakteristika se udává v různých formách, tvar charakteristiky je ale vždy stejný:

$M = f(n)$	teorie strojů
$M = f(s)$	teorie strojů
$n = f(M)$	pohony
$s = f(M)$	pohony

Při zanedbání rozptylu je indukční tok konstantní a proud rotoru přímo úměrný skluzu:

$$I_2 = \frac{U_{i20}}{\frac{R_2}{s} + jX_{\sigma 2s}} = \frac{U_{i20}}{\frac{R_2}{s}} = \frac{U_{i20}}{R_2} \cdot s = k \cdot s$$

Proudová charakteristika

Vlivem rozptylu je ale motor odbuzuje $\Rightarrow$ proud neroste lineárně

Momentová charakteristika

Při konstantním toku by narůstal moment také lineárně

Při odbuzování ale moment není lineární, při velkém odbuzení dokonce klesá.

Rozbor momentové a proudové charakteristiky

Pro rozběh určujeme:

I_z záběrový proud
 M_z záběrový moment

Pro mezní zátěž

$M_{\max}$ maximální moment

Pro danou (jmenovitou) zátěž určujeme (pro rozbor si musíme zvolit průběh zátěžného momentu M_2):

M_n jmenovitý (daný) moment

n_n jmenovité (dané) otáčky

I_n jmenovitý (daný) proud

s_n jmenovitý (daný) skluz

s_{zv} skluz zvratu

Rozbor momentové a proudové charakteristiky

Momentovou charakteristiku lze rozdělit na dvě části:

* stabilní (motor v této části v ustáleném stavu může pracovat) je ohraničena $0 \leq s \leq s_{zv}$ kde s_{zv} je skluz zvratu (odpovídá maximálnímu momentu).

* nestabilní – při $s > s_{zv}$ se motor zastaví (přejde do stavu nakrátko)

Momentová přetížitelnost $p_M =$

udává, jak lze motor momentově přetížit.

$$p_M = (\quad)$$

$$p_z =$$

udává poměr záběrového a jmenovitého momentu

$$p_z = (\quad)$$

Poměrný záběrový proud $p_I =$

udává záběrový proud při zapnutí motoru

$$p_I = (\quad)$$

Závěr z momentového rozboru:

$$\begin{array}{lll} s_{zv} \uparrow & R_2 \uparrow & X_\sigma \downarrow \\ M_z \uparrow & U_1^2 \uparrow & R_2 \uparrow \quad X_\sigma \downarrow \\ M_{\max} \uparrow & U_1^2 \uparrow & R_2 \text{ nezávisí } \quad X_\sigma \downarrow \end{array}$$

1. Ztráty ve vinutí statoru ΔP_{j1} (rotoru ΔP_{j2})
2. Ztráty v železe statoru ΔP_{FE1} (rotoru ΔP_{FE2})
2. Činný elektrický výkon statoru P_1 (rotoru P_2 pouze u kroužkového motoru pokud přivádíme nebo odvádíme el. výkon)
3. Mechanické ztráty ΔP_m ,
4. Mechanický výkon na hřídeli P_m
5. Výkon procházející vzduchovou mezerou $P_{i\delta}$

Ztráty indukčního motoru

Příkon motoru:

$$P_{3f} =$$

Ztráty na motoru:

- * ztráty na vinutí statoru
- * ztráty na vinutí rotoru
- * ztráty v železe (rotor)
- * ztráty v železe (stator)
- * mechanické ztráty

$$\Delta P_{j1} =$$

$$\Delta P_{j2}$$

$$\Delta P_{FE2} \quad (\text{většinou se zanedbávají})$$

$$\Delta P_{FE1}$$

$$\Delta P_m$$

ztráty naprázdno ΔP_0

Mechanický výkon na hřídeli:

$$P_m$$

Rozbor výkonů:

Příkon motoru:

$$P_{3f} =$$

Výkon ve vzduchové mezeře:

$$P_{i\delta} =$$

(viz odvození náhradního schématu motoru)

Mechanický výkon na hřídeli:

$$P_m =$$

(motor s kotvou nakrátko)

$$P_m =$$

K1
při 50 Hz při 50 Hz při 50 Hz
4/4 zátěž 3/4 zátěž 4/4 zátěž

η_N $\eta_{3/4}$ $\cos\varphi_N$
%

ny krytem IP55, využití na te

při 60 Hz

83,2	84,8	0,87
84,8	84,4	0,86
86	86,6	0,89
87,6	87,8	0,88
88,4	88,7	0,85
89,5	89,6	0,84
90,9	91	0,86

při 60 Hz

81	84	0,81
82,8	83,6	0,85
84,2	85,1	0,84
86	86,5	0,83
87	87,4	0,83
88,4	88,1	0,82
89,5	89,6	0,84

při 60 Hz

74	72,6	0,77
78	78,1	0,77
80	79,4	0,74
83	83,4	0,76
85	85,3	0,75
86	86,2	0,73
87,6	87,7	0,77

60 Hz

66	60,2	0,65
70,2	67,6	0,65
69,5	69,7	0,71
76,6	76,4	0,74
79	78,5	0,71
80	78,7	0,69
83,5	83,9	0,70
83,5	84,7	0,70

Účíník a účinnost indukčního motoru

Obecně platí, že účíník a účinnost při jmenovité zátěži závisí na počtu pólů motoru – **čím menší počet pólů tím je účinnost a účíník vyšší.**

Motor je navržen na chod při jmenovitém výkonu a měl by při tomto výkonu pracovat.

S výraznějším poklesem mechanického výkonu klesá účinnost i účíník motoru.

Lze dosáhnout optimálních hodnot účinnosti a účíníku i při sníženém výkonu ?

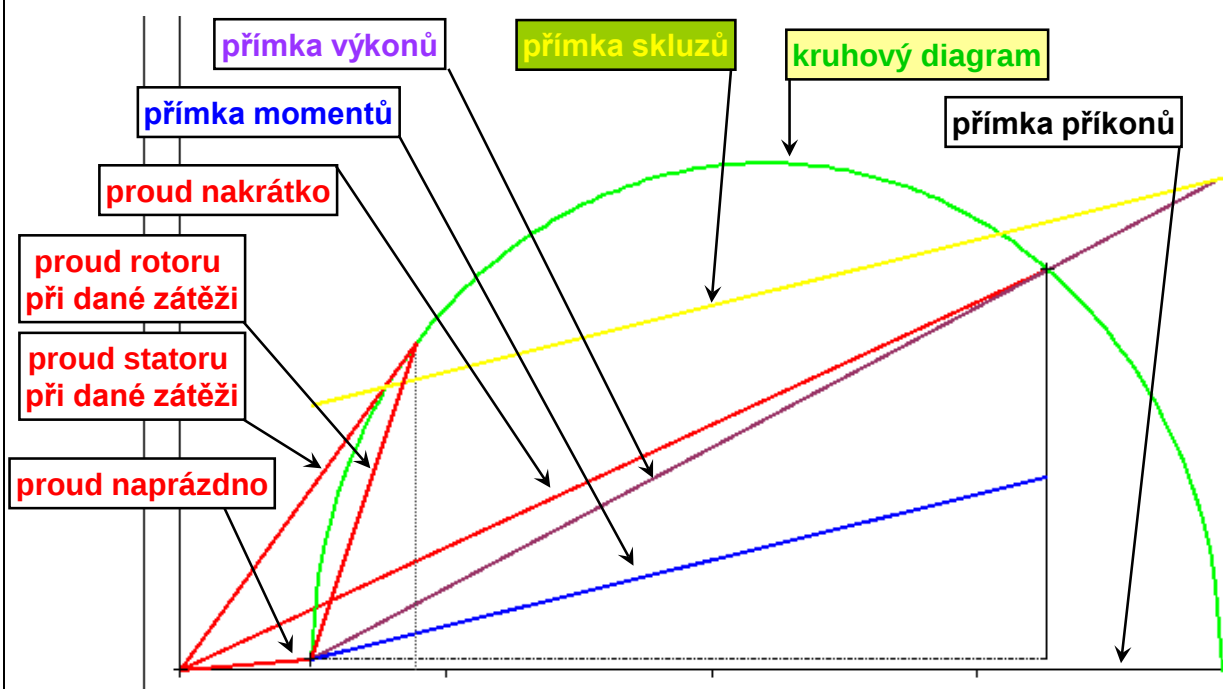
Ano, poklesem napájecího napětí (optimalizace chodu motoru, lze například prostřednictvím měničů kmitočtu a softstartérů). Zároveň ale roste skluz (klesají otáčky).

Kruhový diagram

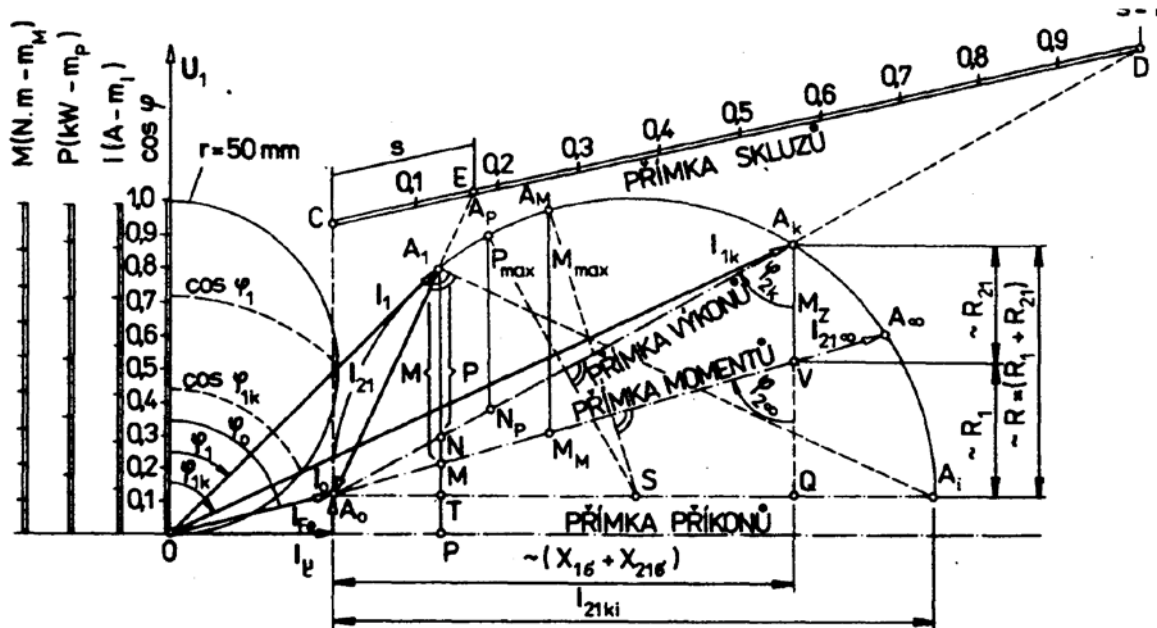
- * Při různých provozních stavech indukčního stroje se pohybuje fázor proudu po kružnici $\Rightarrow$ kruhový diagram je propojení koncových bodů fázoru proudu indukčního stroje.
- * Kruhový (kružnicový) diagram slouží k rozboru různých provozních stavů indukčního stroje
- * Z kruhového diagramu lze odečíst provozní údaje a vlastnosti motoru
- * Existuje několik různých konstrukcí kruhového diagramu, které se liší vstupními předpoklady a následně přesností odečtených hodnot
- * Odvození a sestavení kruhového diagramu se provádí podle zjednodušeného náhradního schématu.
- * Nejpřesnější jsou kruhové diagramy pro motory středních a velkých výkonů
- * Vstupní předpoklady:
 - parametry motoru nezávisí na zatížení
 - napájecí napětí je konstantní
 - ztráty naprázdno jsou konstantní

Popis kruhového diagramu

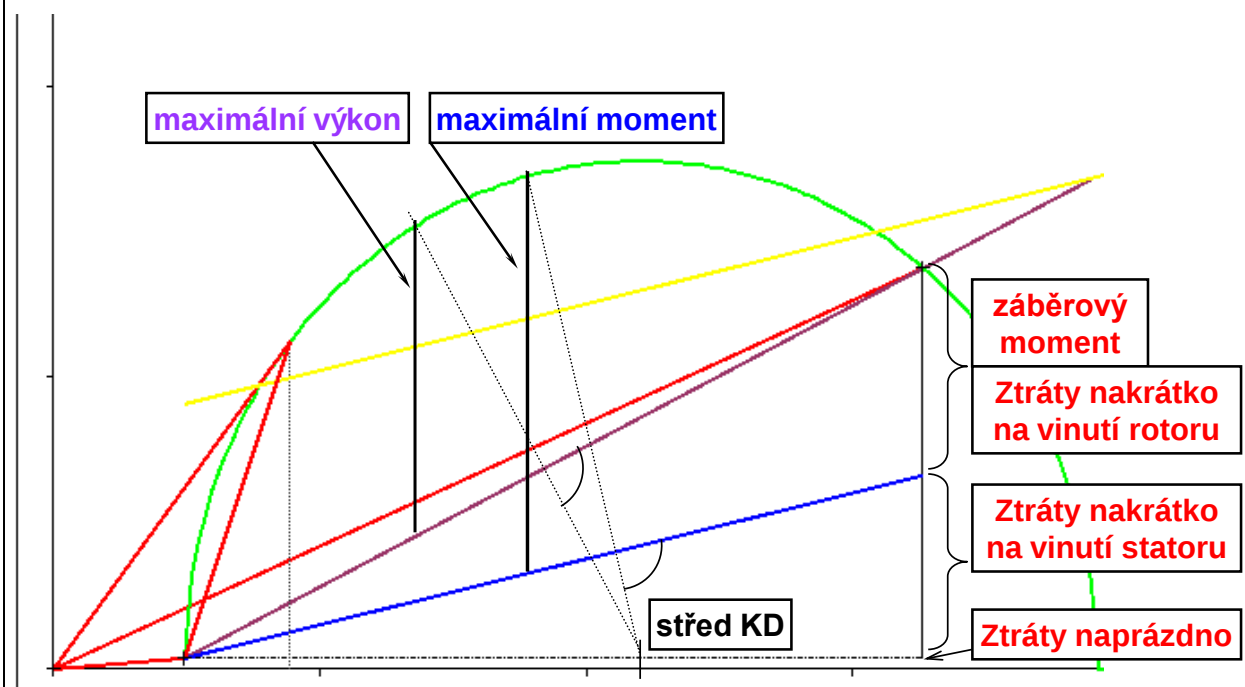
Popis kruhového diagramu na reálném motoru sestaveného na základě naměřených hodnot



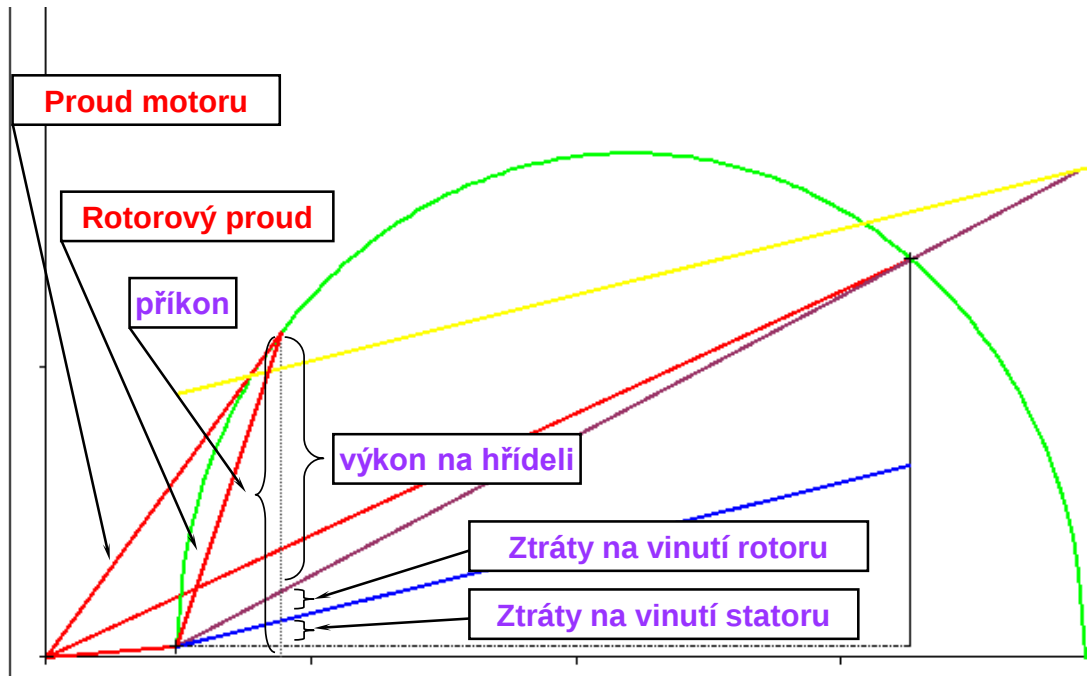
Popis kruhového diagramu



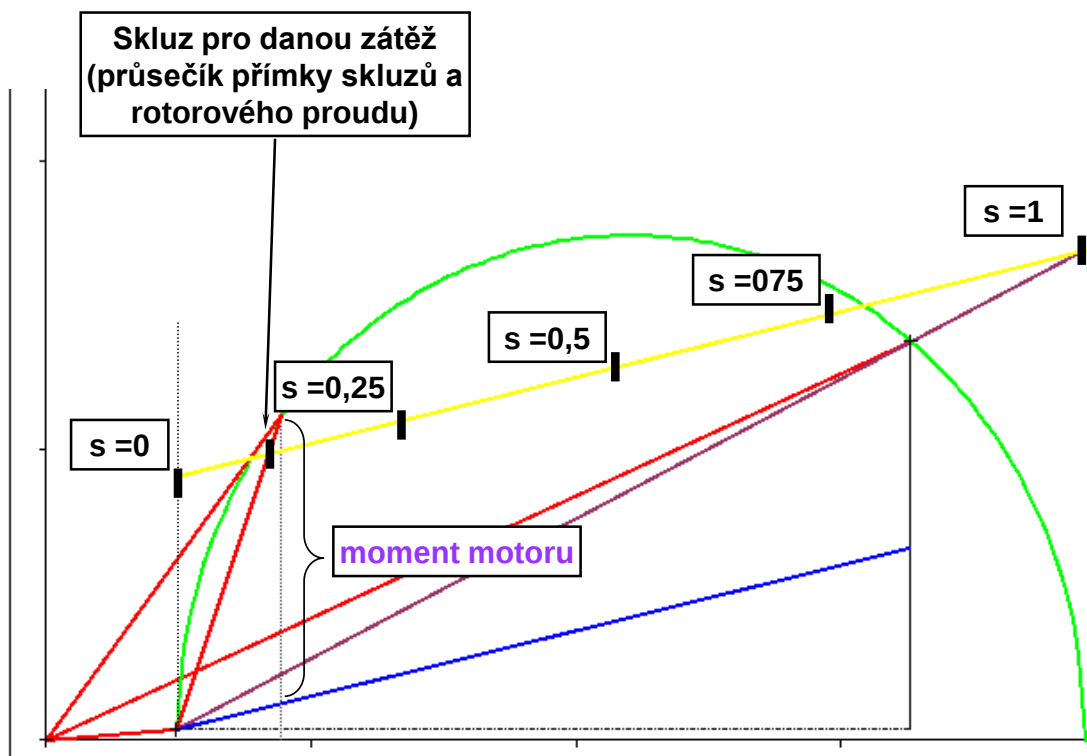
Vyhodnocení konstantních veličin pro daný motor



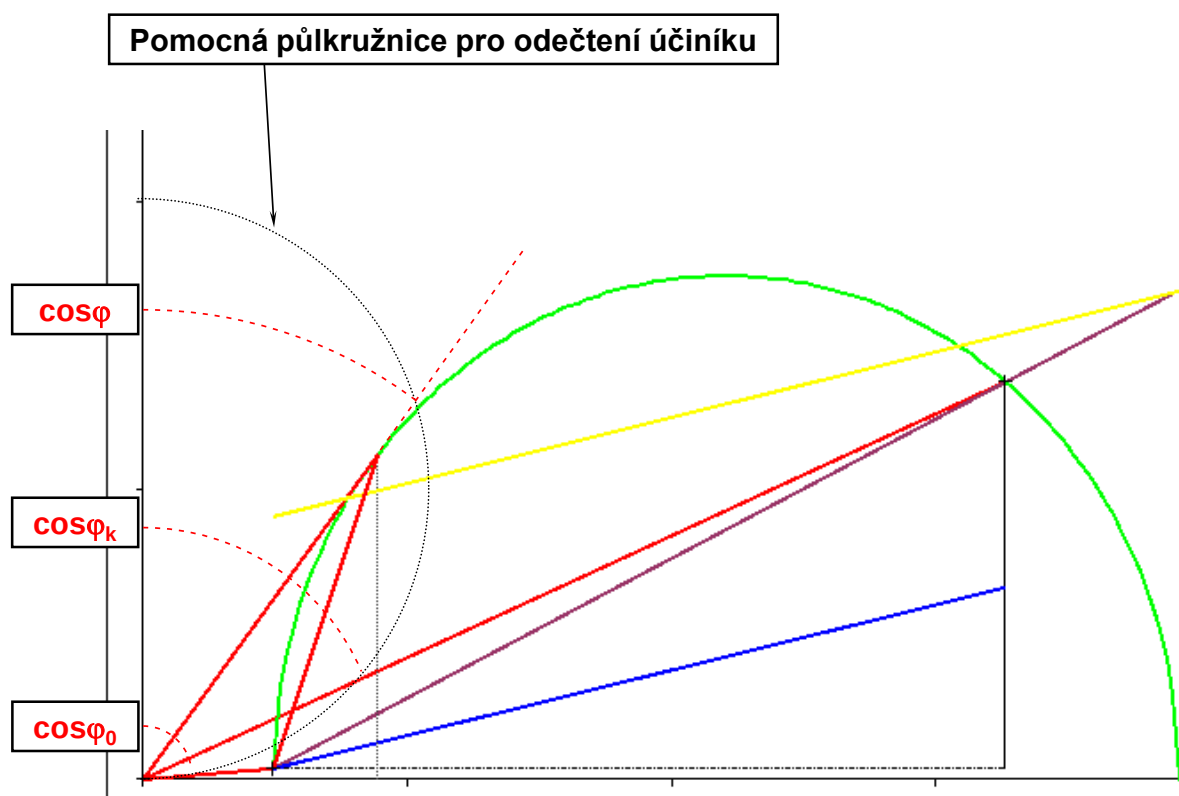
Vyhodnocení veličin pro danou zátěž ($I \cong 1,3 I_n$)



Vyhodnocení veličin pro danou zátěž ($I \cong 1,3 I_n$)



Vyhodnocení veličin pro danou zátěž ($I \cong 1,3 I_n$)



Konstrukce kruhového diagramu

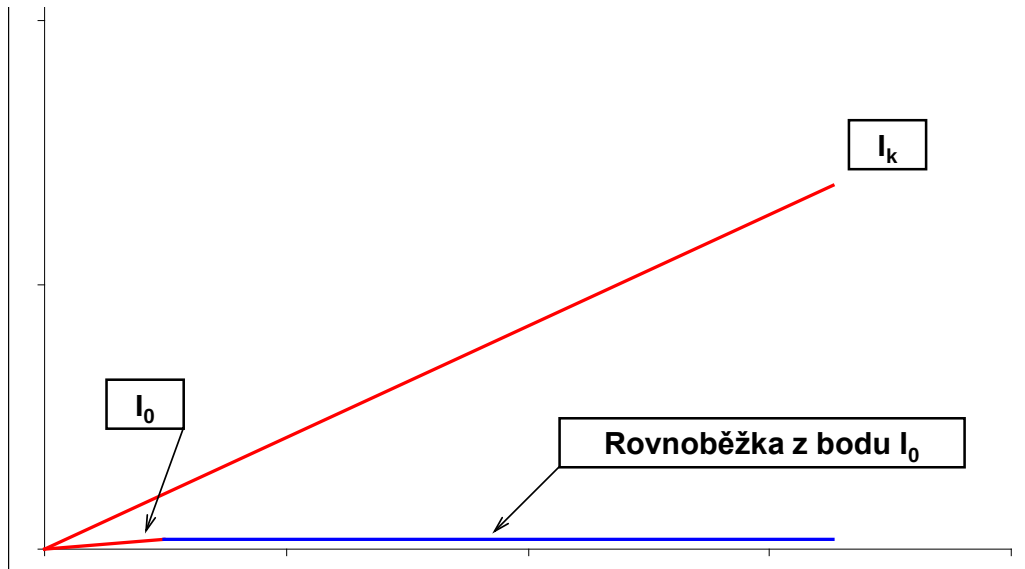
Potřebné vstupní hodnoty:

- | | |
|--|---|
| 1. <u>odporu vinutí statoru přepočtený na provozní teplotu</u> | R_1 (při 75°C) |
| 2. <u>synchronní otáčky motoru</u> | n_s |
| 3. <u>jmenovité napětí motoru</u> | U_n |
| 4. <u>měření naprázdno</u> | <p>proud naprázdno I_0</p> <p>účinník naprázdno $\cos \varphi_0$</p> <p>činná složka proudu naprázdno I_{0c}</p> <p>jalová složka proudu naprázdno I_{0j}</p> |
| 5. <u>měření nakrátko</u> | <p>proud nakrátko I_k</p> <p>účinník nakrátko $\cos \varphi_k$</p> |
| 6. <u>Ztráty nakrátko ve vinutí statoru</u> | ΔP_{j1k} |
| | $\Delta P_{j1k} = 3 * R_1 * I_k^2$ |

Pozn. Konstrukci proudů naprázdno a nakrátko lze provést přes účinník nebo přes činnou a jalovou složku. U proudu naprázdno je výhodnější první způsob u proudu nakrátko jsou možné obě varianty.

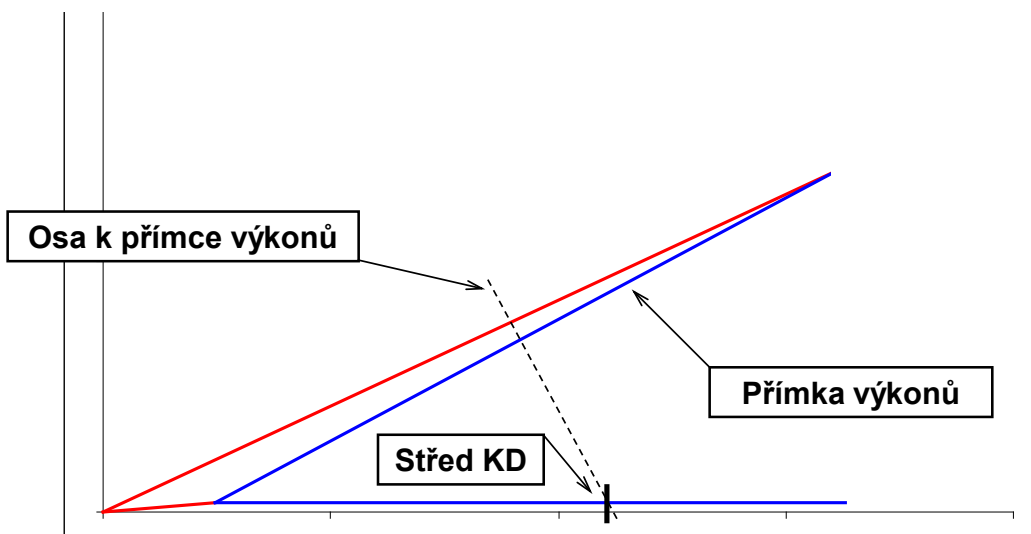
Postup při kreslení:

2. Z měření naprázdno vypočítáme činnou a jalovou složku proudu a pomocí měřítka určíme koncový bod fázoru I_0
3. Stejným způsobem určíme fázor proud I_k
4. V koncovém bodě fázoru bodě I_0 sestrojíme rovnoběžku s osou x



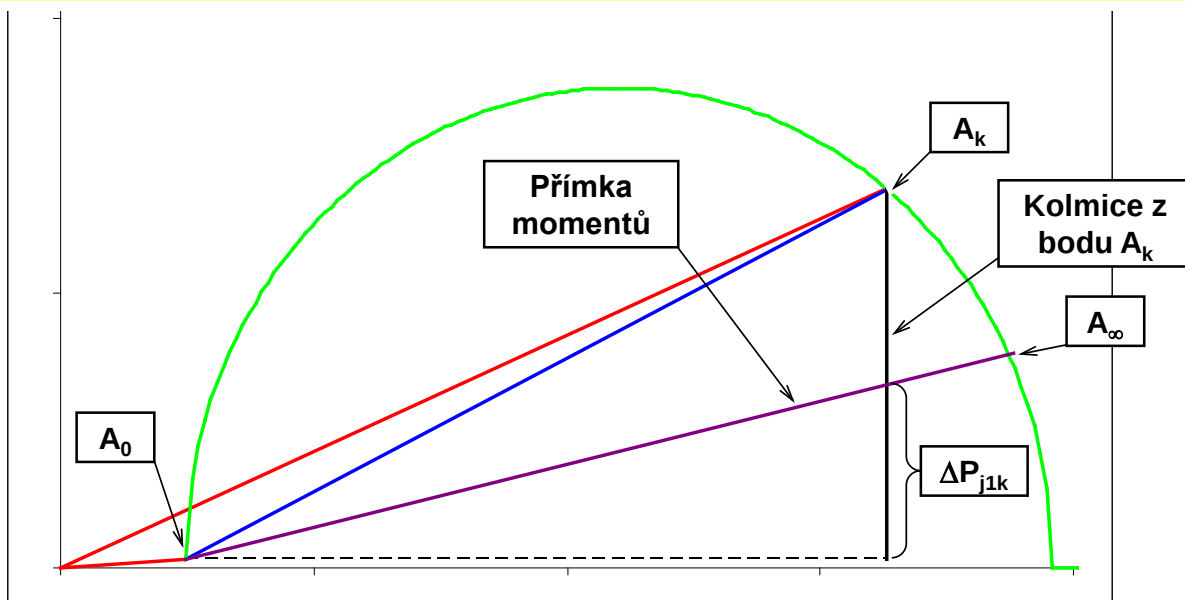
Postup při kreslení:

5. Spojíme koncové body fázorů I_0 a I_k (přímka výkonů)
6. Vytvoříme osu přímky výkonů
7. Průsečík osy přímky výkonů a rovnoběžkou s osou x – střed kruhového diagramu



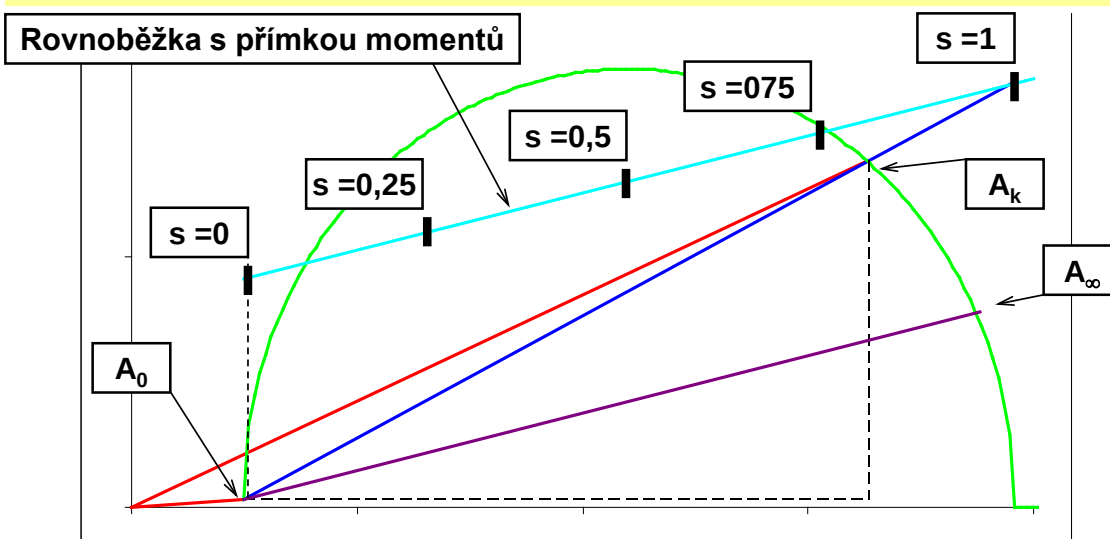
Postup při kreslení:

8. Sestrojíme kružnici
9. Z bodu A_k sestrojíme kolmici na osu x
10. Na kolmici vyneseme ΔP_{j1k} , vytvoříme přímku momentů
11. Část kružnice $A_0 - A_k$ představuje motor, $A_k - A_\infty \cong$ brzda, $A_\infty - A_0 \cong$ generátor



Postup při kreslení:

12. Sestrojíme rovnoběžku s přímkou momentů. Poloha rovnoběžky je libovolná, optimální je její umístění mimo KD
13. Z bodu A_0 sestrojíme kolmici na osu x
14. Přímka skluzů je omezena průsečíkem kolmice z bodu A_0 ($s = 0$) a průsečíkem s přímkou výkonů ($s = 1$)
15. Na přímce skluzů vytvoříme stupnici



Možnosti provozní indukčního stroje

Indukční stroj může pracovat v různých provozních režimech:

1. Indukční motor

V jakém rozsahu skluzů může pracovat indukční motor ?

$$0 \leq n \leq n_s \quad \Rightarrow$$

Proved'te rozbor činného a jalového výkonu motoru (zdroj, spotřebič)

$$P > 0 \quad Q > 0$$

2. Indukční brzda

Jak můžeme definovat režim indukční brzda a v jakém rozsahu skluzů může stroj pracovat ?

V režimu indukční brzda se rotor otáčí proti točivému poli statoru

$$n < 0 \quad \Rightarrow$$

Proved'te rozbor činného a jalového výkonu motoru (zdroj, spotřebič)

$$P > 0 \quad Q > 0$$

Možnosti provozní indukčního stroje

3. Indukční generátor

Jak můžeme definovat režim indukční generátor a v jakém rozsahu skluzů může stroj pracovat ?

V režimu generátor se rotor otáčí rychleji než točivé pole statoru

$$n > n_s \quad \Rightarrow$$

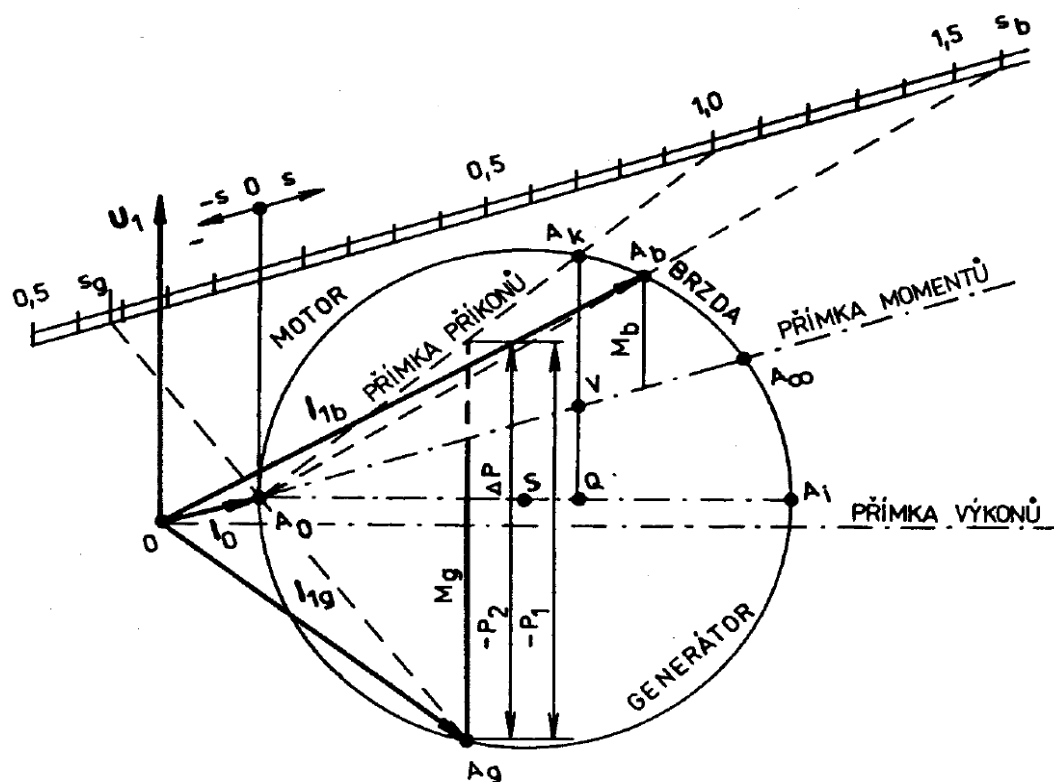
Proved'te rozbor činného a jalového výkonu motoru (zdroj, spotřebič)

$$P < 0 \quad Q > 0$$

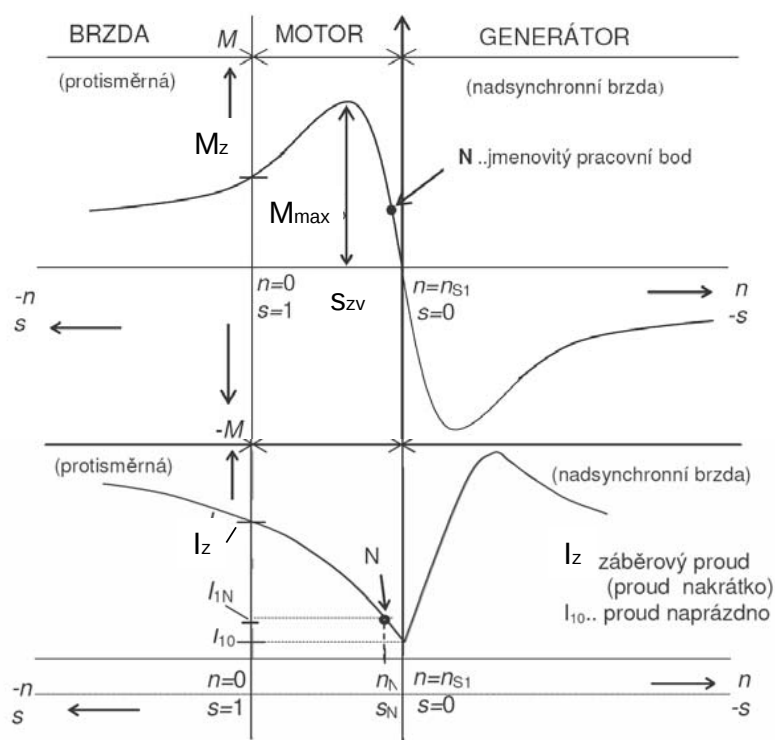
Závěr:

1. Indukční motor i brzda odebírají činný výkon ze sítě, generátor je zdrojem činného výkonu
2. V režimu indukční brzda odebírá stroj velký proud ze sítě $\Rightarrow$ hrozí poškození stroje $\Rightarrow$ nutnost snížit napětí.
3. Při změně pořadí fází v plném chodu motor je $s \cong 2 \Rightarrow$ brzdění protiproudem
4. Ve všech režimech je indukční stroj spotřebičem jalové energie. Proto se nedá indukční generátor použít pro velké výkony (nejčastěji MVE nebo větrné elektrárny).

Kompletní kruhový diagram



Kompletní momentová a proudová charakteristika



Úvod do problematiky

Jaké problémy vznikají při spouštění indukčních motorů ?

V okamžiku připojení motoru k síti je motor ve stavu nakrátko (rotor stojí, magnetické pole se otáčí synchronní rychlostí, skluz = 1).

Jak je velký záběrový proud a čím je omezen?

Proudový ráz se pohybuje v rozsahu $I_z = (4 - 7) \cdot I_n$. Obecně platí, že u strojů s méně póly je záběrový proud větší. Proudový ráz je omezen impedancí motoru (podélnými parametry).

Jaké jsou důsledky proudového rázu?

1. Tepelné namáhání stroje
u lehkého a středního rozběhu lze většinou zanedbat (krátký čas)
2. Úbytek napětí v síti
nepříznivý jev a musí se s ním počítat, zejména v rozlehlé síti
3. Problémy s jištěním
nutnost použít jistič s charakteristikou D, pomalou pojistku nebo motorový spouštěč

K1

Princip spouštění

Jakým způsobem lze obecně snížit proud ?

Podle Ohmova zákona lze snížit proud snížením napětí, zvýšením odporu nebo kombinací obou způsobů.

Jaké jsou základní výhody a nevýhody obou principů ?

1. Snížení napájecího napětí ($U < U_n$)

- Výhody: * není třeba speciální motor
Nevýhody: * s poklesem napětí klesá i moment ($M \sim U^2$)
* nutné přídavné zařízení

2. Zvýšení odporu v rotoru

- Výhody: * roste záběrový moment (lze dosáhnout i $M_z = M_{\max}$)
* měkčí (plynulejší) rozběh
Nevýhody: * nutný speciální motor
* zvýšení ztrát při rozběhu, v některých případech i při chodu motoru

Přímé připojení motoru k síti

Při přímém připojení musíme vzít v úvahu velký záběrový proud a důsledky tohoto proudu – zejména úbytek napětí.

Je určena hranice výkonů pro přímé připojení k síti ?

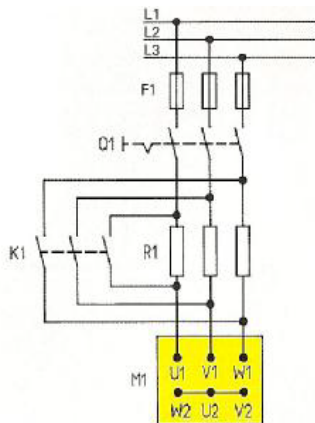
Není, možnosti jsou dány místními podmínkami:

- * úbytek napětí může ohrozit činnost dalších zařízení
- * úbytek napětí může způsobit problémy jiným odběratelům

Obecně platí zásada:

- * nemá-li podnik (majitel motoru) vlastní distribuční transformátor, pak by se měl omezit záběrový proud i při relativně malých výkonech motorů (zhruba do 3 kW, podle místních podmínek může být ale i méně).
- * má-li podnik vlastní distribuční transformátor, je to jeho problém. V některých případech se spouští přímo motory i desítky kW.

Rozběh motoru snížením napětí



1. spouštěcí odpory

Odpory jsou připojeny sériově k motoru. Na odporech se vytvoří úbytek napětí $\Rightarrow$ snížení napájecího napětí motoru. Po rozběhu se odpory vyřadí (zkratují). Příliš se nepoužívá.

Výhoda: * jednoduchost

Nevýhoda: * ztrátový rozběh
* proud klesá s první mocninou, ale moment s druhou mocninou napětí

Použití: jednoduché aplikace s malým požadavkem na záběrový moment

$$I_z = I_{zn} * \left(\frac{U_z}{U_n} \right)$$
$$M_z = M_{zn} * \left(\frac{U_z}{U_n} \right)^2$$

Rozběh motoru snížením napětí

2. spouštěcí tlumivky

Tlumivky jsou připojeny sériově k motoru. Na cívkách se vytvoří úbytek napětí $\Rightarrow$ snížení napájecího napětí motoru. Po rozběhu se tlumivky vyřadí (zkratují). Omezené použití

Výhoda: * jednoduchost

* minimální ztráty

Nevýhoda: * zhoršení účinníku

* proud klesá s první mocninou, ale moment s druhou mocninou napětí

Použití: jednoduché aplikace s malým požadavkem na záběrový moment

Rozběh motoru snížením napětí

3. spouštěcí autotransformátor

Spouštění probíhá ve dvou stupních.

1. Nastavení napětí na autotransformátoru

2. Vytvoření úbytku napětí na cívce autotransformátoru

Výhoda: * minimální ztráty

* jemnější rozběh (2 spouštěcí stupně)

* moment klesá se stejnou mocninou jako proud

Nevýhoda: * nutný autotransformátor

Převod
autotransformátoru:

Záběrný proud ze sítě:

Záběrný proud
sníženým napětím:

Průběh spouštění:

1. Sepnutí spínače Q1 a Q3 - velikost napětí je dána poměrem na autotransformátoru
2. Sepnutí spínače Q1 - velikost napětí je dána úbytkem napětí na cívice transformátoru
3. Sepnutí spínače Q1 a Q2 - autotransformátor je vyřazen

$$I_s = I_{zn} * \left(\frac{U_M}{U_s} \right)^2$$
$$M_z = M_{zn} * \left(\frac{U_M}{U_s} \right)^2$$

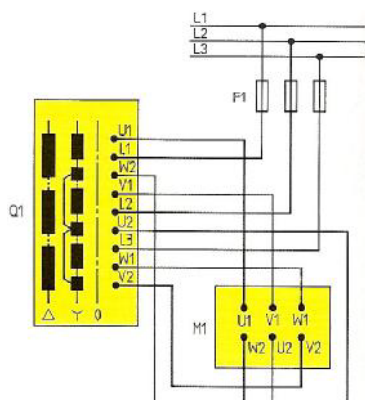
K1

Rozběh motoru snížením napětí

4. přepínač hvězda - trojúhelník

Nejčastější způsob spouštění motorů středních výkonů.

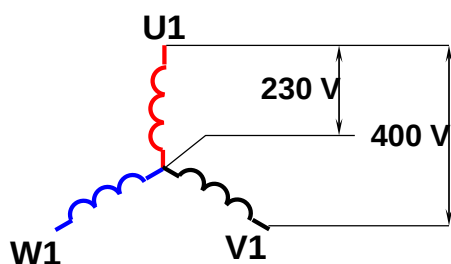
- Výhoda:
- * jednoduchost
 - * možná kombinace ručního a automatického spínače
 - * moment klesá ve stejném poměru jako proud
- Nevýhoda:
- * nelze nastavit velikost záběrového proudu (momentu)
 - * lze použít pouze u motorů se štítkovým napětím 690/400 V (660/380V)



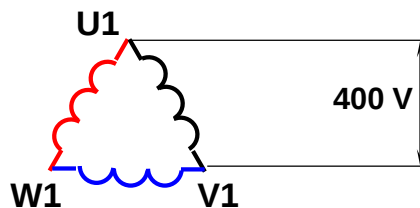
Realizace:

- * mechanický přepínač Y/D
- * stykačová kombinace
 - 3 samostatné stykače
 - stykačový celek Y/D od výrobce

zapojení do hvězdy



zapojení do trojúhelníku



Výsledný poměr proudů:

$$\frac{I_{sY}}{I_{s\Delta}} = \frac{\frac{U_s}{\sqrt{3} * Z}}{\frac{\sqrt{3} * U_s}{Z}} = \frac{1}{3} \Rightarrow I_{sY} = \frac{I_{s\Delta}}{3}$$

Výsledný poměr momentů:

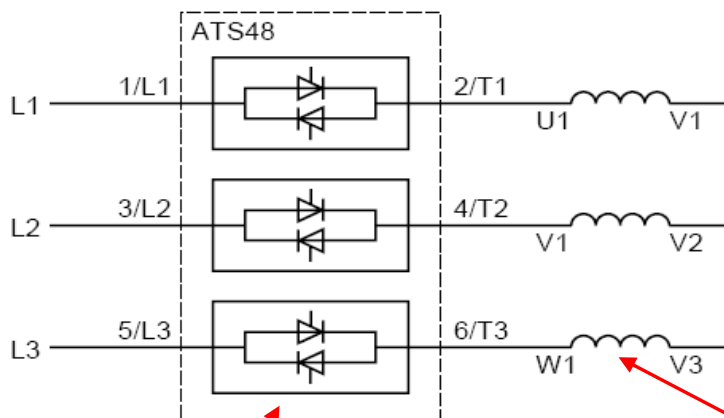
$$\frac{M_{zY}}{M_{z\Delta}} \approx \left(\frac{U_f}{U_s} \right)^2 = \left(\frac{U_f}{\sqrt{3} * U_f} \right)^2 = \frac{1}{3}$$

Rozběh motoru snížením napětí

5. elektronický spouštěč (softstartér)

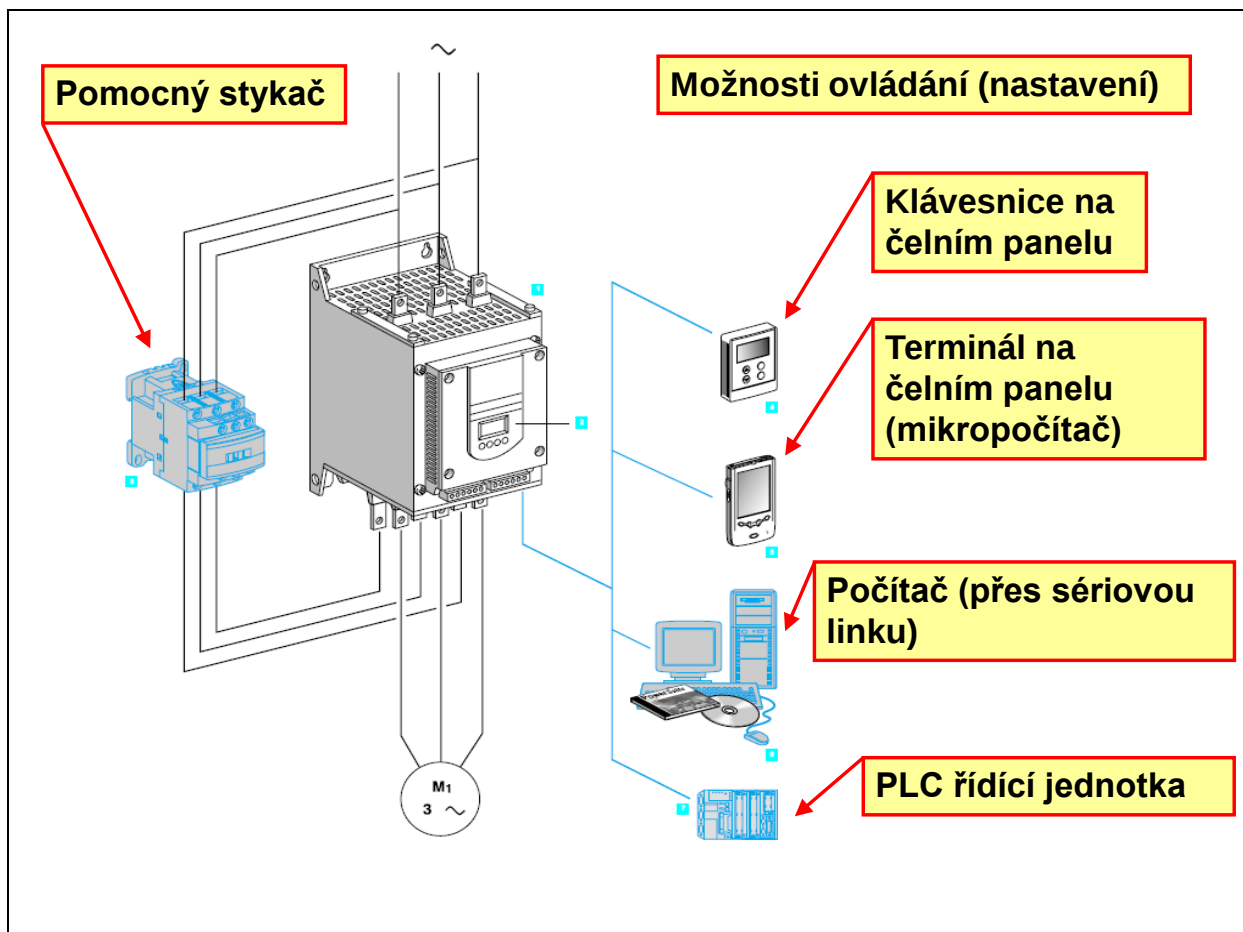
Moderní způsob spouštění, který je vhodný zejména při častém spouštění s různými požadavky na záběrový moment a dalšími nároky na rozběh motoru (např. časové funkce).

Silový rozvod:



Tyristory v antiparalelním zapojení

Vinutí motoru



K1

Funkční možnosti

- * možnost nastavení žádaného průběhu momentu (podle zátěže)
- * po rozběhu lze překlenout stykačem



Ochranné funkce

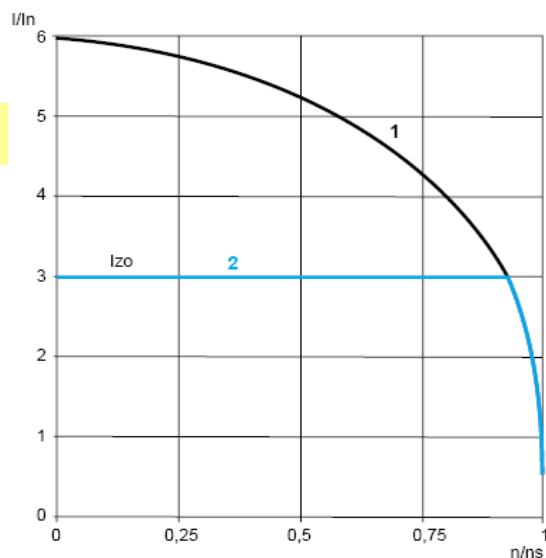
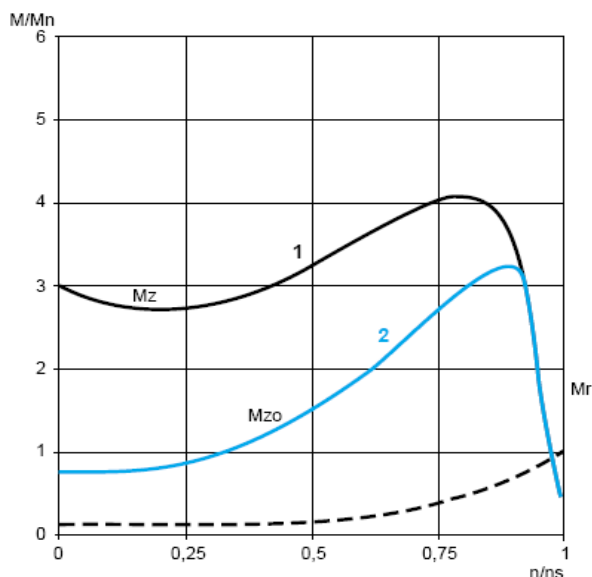
- * tepelná ochrana motoru (ochrana proti přetížení)
- * zpracování výstupů z PTC čidel motoru
- * hlídání překročení doby rozběhu (rozběhová ochrana)
- ochrana proti nadproudům

Další možnosti nastavení (výběr)

- * doba rozběhu a doba doběhu
- * různé možnosti zastavení motoru
- * režim „optimalizace“ motoru
- * napěťová podpora (boost) v počátku rozběhu

Charakteristiky

Proudová charakteristika:

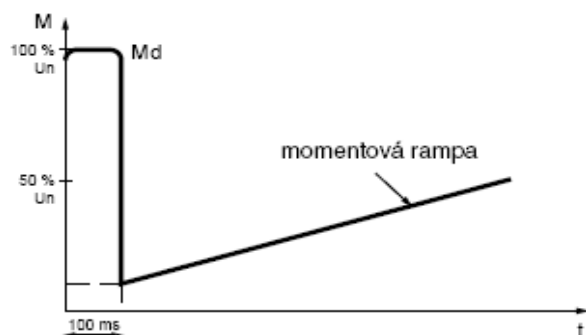


1 – normální spouštění
2 – použití softstartéru

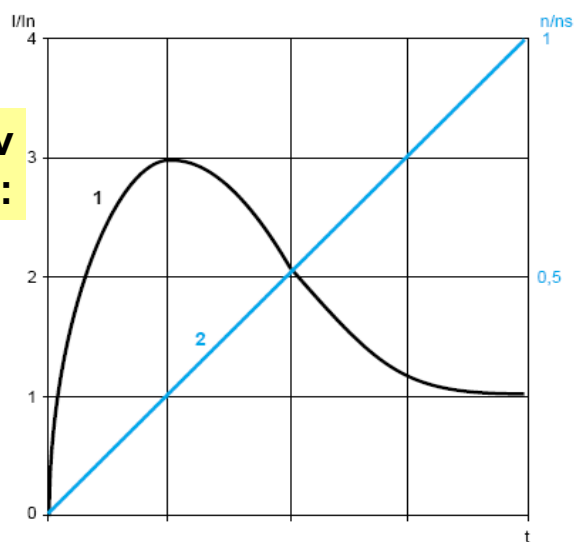
Momentová charakteristika

Charakteristiky

Průběh otáček a proudu v závislosti na čase :



Aplikace napětového boostu odpovídajícího 100 % jmenovitého napětí motoru



1 – proud
2 – otáčky

Napětový „boost“

Výběr ze seznamu parametrů – softstartéru MSF 2.0

Rozběh

310 Způsob rozběhu 1, 2, 3, 4

1. Momentový lineární
2. Momentový kvadratický
3. Napěťový
4. Přímý (DOL)

311 Počáteční moment při rozběhu 0-250% T_n

312 Konečný moment při rozběhu 25-250% T_n

313 Počáteční napětí při rozběhu 25-80% U

314 Proudové omezení při rozběhu OFF, 150-500% I_n

315 Doba rozběhu 1-60 s

316 Zesílení momentu-proudové omezení oFF, 300-700% I_n

317 Zesílení momentu-doba působení 0,1-2,0 s

Hlídač zátěže (alarmy, výstrahy dle výkonu)

Ochrany motoru (tepelná, PTC čidla, omezení počtu startů, zablokování rotoru)

Ochrany sítě (nesymetrie, přepětí, podpětí, sled fází)

Analogové vstupy a výstupy

Digitální vstupy a výstupy

Diagnostika (měření $U, I, P, \cos\phi, M,$)

Provozní data (doba chodu, spotřeba energie)

Zastavení

320 Způsob zastavení 1, 2, 3, 4, 5

1. Momentové lineární
2. Momentové kvadratické
3. Napěťové
4. Volný doběh
5. Brzda

321 Konečný moment při doběhu 0-100% T_n

322 Snižování napětí při doběhu 100-40% U

323 Způsob brzdění 1, 2

1. Dynamická vektorová brzda

2. Protiproudá brzda

324 Brzdění-intenzita 150-500%

325 Doba doběhu 1-120 s

326 Porucha-intenzita brzdění oFF, 150-500%

327 Porucha-doba brzdění 1-120 s 10 1-4

Nízké otáčky / JOG (tipování)

330 Nízké otáčky-intenzita 10-100

331 Nízké otáčky-čas při rozběhu oFF, 1-60 s

332 Nízké otáčky-čas při doběhu oFF, 1-60 s

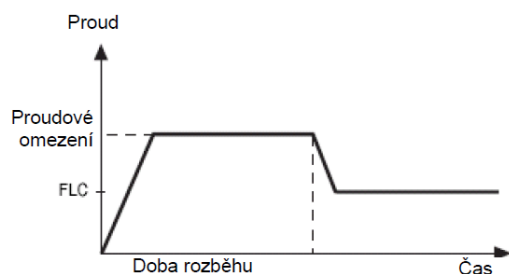
333 DC-brzda při nízkých otáčkách oFF, 1-60 s

334 Tipování vpřed oFF, on

335 Tipování vzad oFF, on

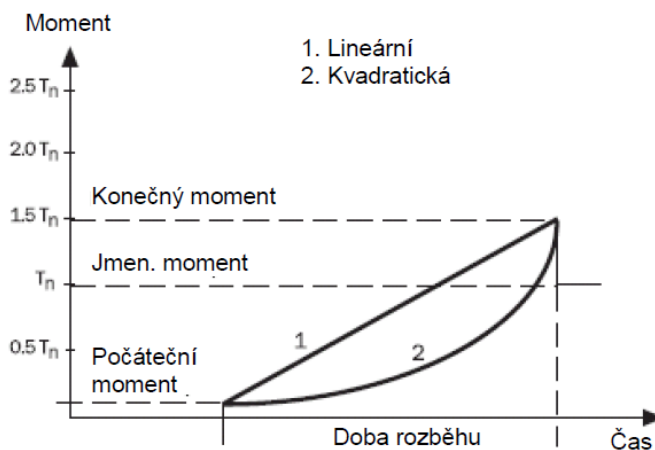
K1

Proudové omezení

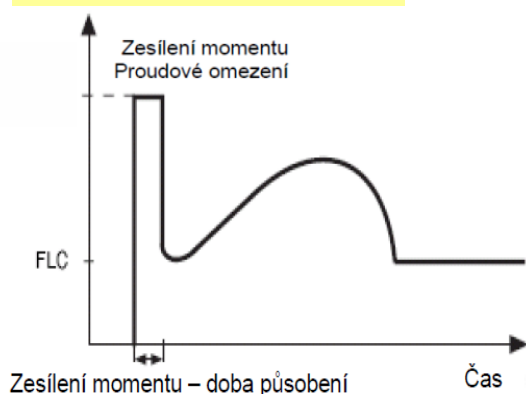


Přímý start v kombinaci s proudovým omezením

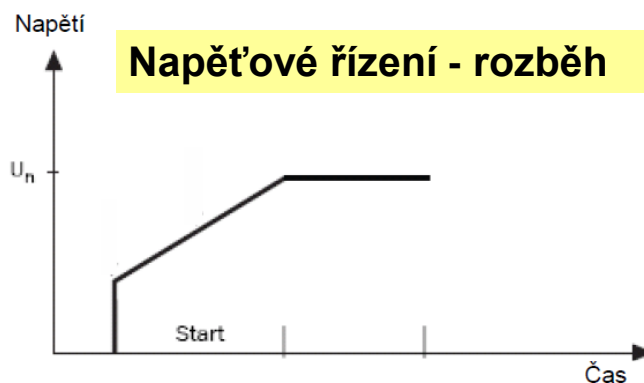
Momentové řízení - rozběh



Zesílení momentu



Napěťové řízení - rozběh



K1

Brzdění

Dynamická vektorová brzda

- brzdňý moment aplikován na motor tak že s klesajícími otáčkami bude zvyšován brzdňý moment.

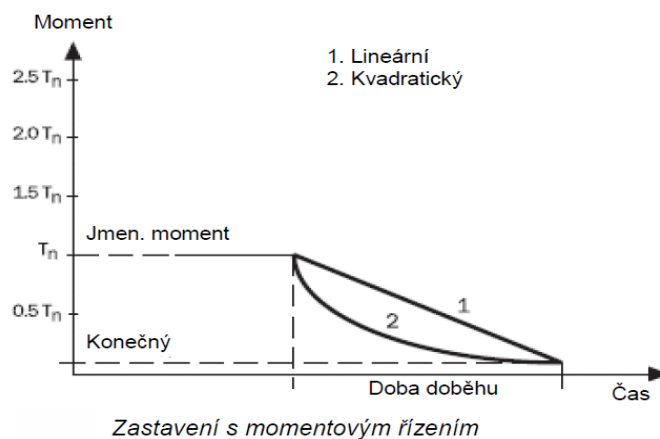
Protiproudá brzda

Využitím protiproudé brzdý je možno aplikovat na motor velmi vysoký brzdňý moment dokonce i v blízkosti synchronních otáček. Takto mohou být velmi rychle zastaveny veškeré typy zátěží.

Brzdění při poruše

Většinu poruch je možno konfigurovat tak, že pokud dojde k jejich aktivaci, pak motor je buďto zastaven a nebo pokračuje v provozu.

Momentové řízení - doběh

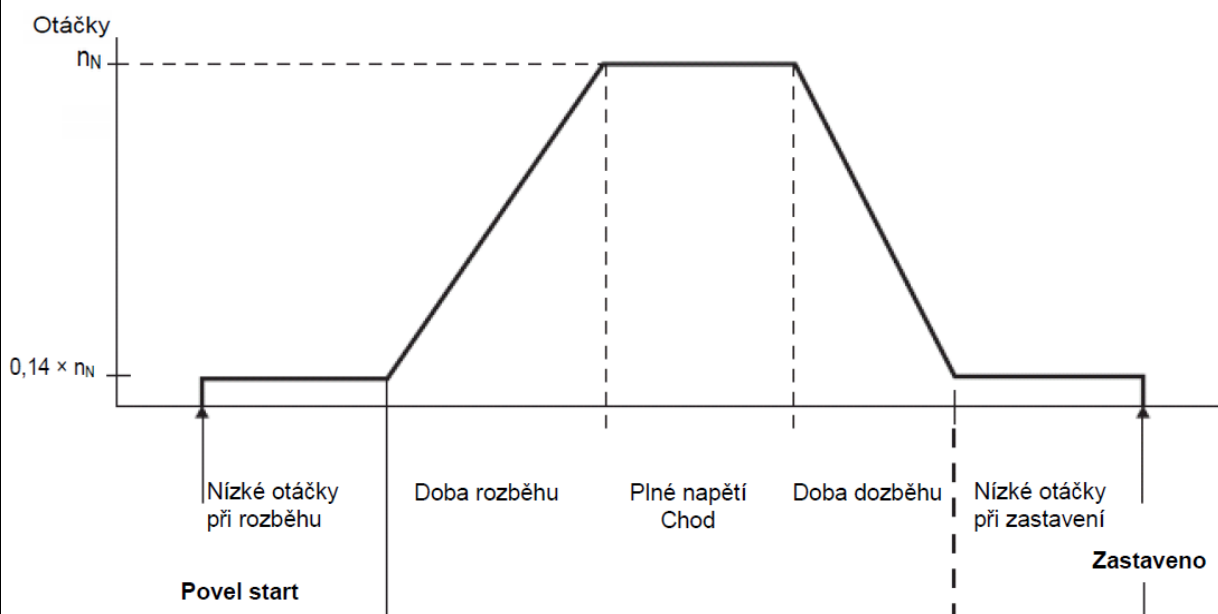


Napěťové řízení - doběh



Funkce nízké otáčky

Po omezenou dobu lze provozovat motor na pevně stanovených nízkých otáčkách. Moment je omezen asi na 30% M_n – není vhodné pro aplikace vyžadující velký záběrný moment



Rozběh motoru snížením napětí

6. frekvenční měnič

Moderní způsob spouštění, který umožňuje zároveň plynulou a bezztrátovou regulaci otáček.

Funkce a provedení měniče bude probráno u regulace otáček



Rozběh motoru zvýšením odporu v rotoru

Jaké jsou hlavní vlastnosti spouštění:

- * nutný speciální motor
- * zvýšení záběrového momentu ($M_z = M_{max}$)
- * zvýšení ztrát při rozběhu (zejména při dlouhém rozběhu)
- * v některých případech zvýšení ztrát i při chodu motoru
- * plynulejší rozběh

Hlavní možnosti provedení:

- * kroužkový motor
- * motor s odporovou klecí
- * motor s dvojitou klecí
- * motor s vírovou klecí

Kroužkový motor

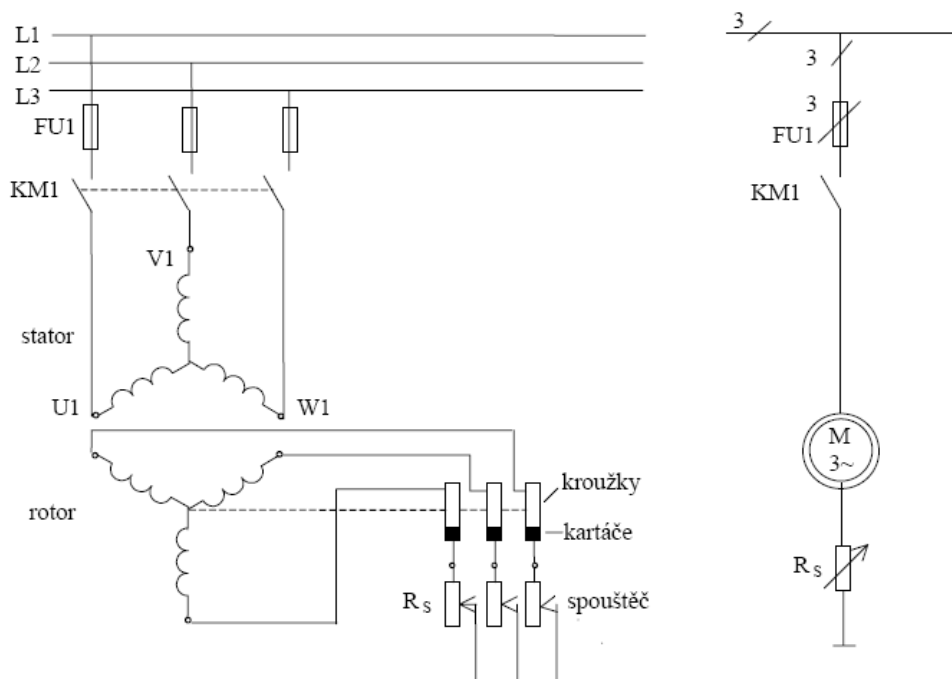
Konstrukce:

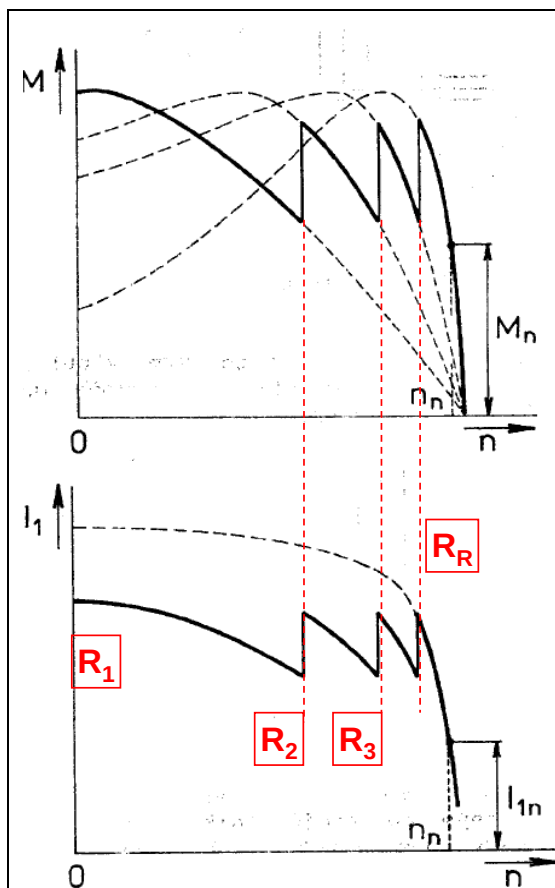
- * stator motoru je stejný jako u indukčního motoru s kotvou nakrátko
- * rotor je vinutý
 - na rotoru je uloženo trojfázové vinutí
 - konce vinutí jsou vyvedeny na kroužky
 - na kroužky dosedají kartáče
 - kartáče jsou vyvedeny na spouštěcí odpory

Průběh spouštění:

- * motor se rozbíhá s maximálním spouštěcím odporem
- * v průběhu rozběhu se jednotlivé odporové stupně vyřazují (počet stupňů je dán požadavkem ne rovnoměrnost spouštění)
- * na konci rozběhu se všechny odpory zkratují nebo se zkratují kroužky
- * odpor v rotoru je dán odporem vinutí

Kroužkový motor s kontaktním spínáním odporů





Průběh momentové a proudové charakteristiky

Kolik má motor spouštěcích stupňů ?

3 stupně

Jaký vztah platí mezi jednotlivými odpory ?

$$R_1 > R_2 > R_3 > R_R$$

Jaká může být realizace spínání ?

- časový spínač
- spínání podle velikosti proudu
- spínání podle otáček

Výpočet rotorového spouštěče

Základní vstupní parametry:

- * maximální záběrový proud $I_{\max} = 2,5 \cdot I_n$ dle ČSN
- * přepínací proud I_p
- * nerovnoměrnost spouštění $g = I_m / I_p < 1,9$ dle ČSN

Vstupní hodnoty pro výpočet:

- * měření nakrátko R_k a X_k
- * měření odporu vinutí rotoru R_R

Výsledek výpočtu:

- * počet spouštěcích stupňů n
- * velikost jednotlivých odporových stupňů $R_1, R_2, R_3, \dots$
- * ztrátový výkon jednotlivých odporových stupňů $P_1, P_2, P_3, \dots$
- * realizace spouštění

Výpočet rotorového spouštěče

1. Výpočet odporu v rotoru

a) maximální proud

$$I_{\max} = 2,5 \cdot I_n$$

b) spouštěcí impedance

$$Z_s = \frac{U_{fn}}{I_{\max}}$$

c) celkový odpor spouštěče
přepočtený na stator

$$Z_s = \sqrt{(R_k + R_{s1})^2 + X_k^2} \Rightarrow$$
$$R_{s1} = \sqrt{Z_s^2 - X_k^2} - R_k$$

d) skutečný celkový odpor
spouštěče

$$R_s = R_{s1} \cdot \frac{m_2}{m_1} \cdot \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2$$

kde U_1 jmenovité napětí na statoru
 U_2 jmenovité napětí na rotoru

Výpočet rotorového spouštěče

2. Výpočet počtu odporových stupňů (n)

a) nerovnoměrnost spouštění

$$g = \frac{I_{\max}}{I_p} = \frac{s_1}{s_2} = \frac{s_2}{s_3} = \frac{s_3}{s_4} = \dots = \frac{s_n}{s_j}$$

kde $s_1 = 1$ (rotor se netočí)

$s_2, s_3, \dots$ – okamžik přepnutí odporového stupně

b) odpor v rotoru je
úměrný skluzu $\Rightarrow$

$$g = \frac{I_{\max}}{I_p} = \frac{R_{c1}}{R_{c2}} = \frac{R_{c2}}{R_{c3}} = \frac{R_{c3}}{R_{c4}} = \dots = \frac{R_{cn}}{R_R}$$

kde R_{c1} je maximální odpor v prvním stupni spouštění

$$R_{c1} = R_R + R_s$$

R_R ... odpor vinutí rotoru

R_s ... vypočtený odpor rotorového spouštěče

(vliv odporu statoru na průběh spouštění se zanedbává)

Výpočet rotorového spouštěče

c) určení odporů pro spouštění (pro $n = 3$)

$$R_{c3} = R_R \cdot g$$

$$R_{c2} = R_{c3} \cdot g = R_R \cdot g^2$$

$$R_{c1} = R_{c2} \cdot g = R_{c3} \cdot g^2 = R_R \cdot g^3$$

obecně platí

$$R_{c1} = R_s + R_R = R_R \cdot g^n$$

kde n je počet spouštěcích stupňů

d) výpočet počtu spouštěcích stupňů ze známé nerovnoměrnosti spouštění

$$n = \frac{\log \frac{R_{c1}}{R_R}}{\log g}$$

e) výpočet nerovnoměrnosti ze známého počtu spouštěcích stupňů

$$g = \sqrt[n]{\frac{R_{c1}}{R_R}} = \sqrt[n]{\frac{R_s + R_R}{R_R}}$$

Výpočet rotorového spouštěče

f) Výpočet jednotlivých odporů, pro $n=3$

$$R_1 = R_{c1} - R_{c2}$$

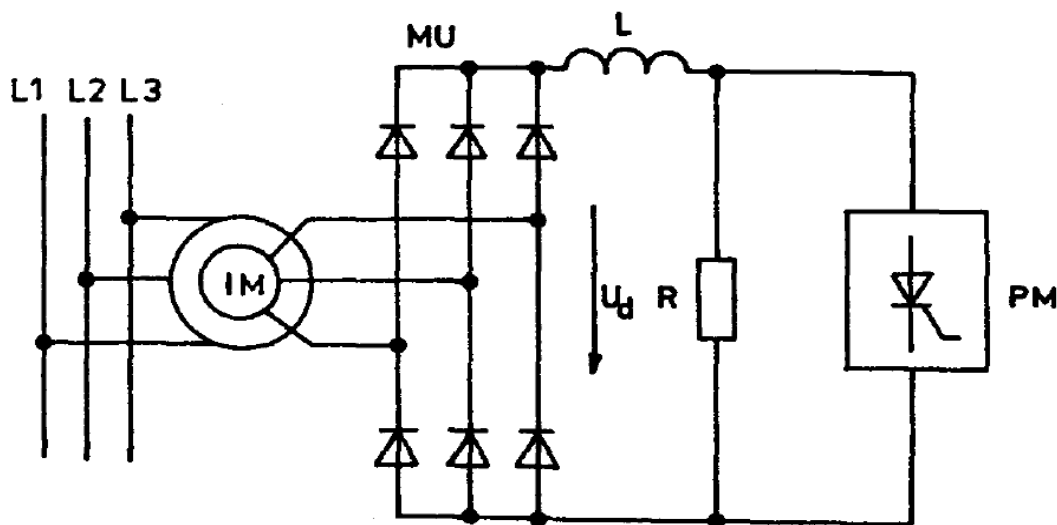
$$R_2 = R_{c2} - R_{c3}$$

$$R_3 = R_{c3} - R_R$$

Postup při návrhu:

1. Měření nakrátko a měření odporu vinutí rotoru
2. Výpočet podélných parametrů motoru
3. Výpočet spouštěcí impedance
4. Výpočet celkového odporu v rotoru při sepnutí motoru
5. Výpočet počtu spouštěcích stupňů ze zadané nerovnoměrnosti spouštění (pravděpodobně nevyjde celé číslo)
6. Určení skutečného počtu spouštěcích stupňů (celé číslo)
7. Výpočet skutečné nerovnoměrnosti spuštění (je menší než zadaná)
8. Výpočet jednotlivých skutečných odporových stupňů
9. Výpočet jednotlivých odporů

Kroužkový motor se spínáním odporů prostřednictvím pulzního měniče



Řízení změnou střídy

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{t_z + t_v} \quad R_e = R \cdot \frac{t_v}{t_z + t_v} = R \cdot \frac{t_v}{T}$$

Řízení změnou frekvence

$$R_e = R \cdot \frac{t_v}{t_z + t_v} = R \cdot t_v \cdot f$$

Příklad

Zadání: Vypočítejte počet spouštěcích stupňů a kroužkového motoru při zadané nesouměrnosti spouštění 1,8 pro síťové napětí 400V, odpor vinutí rotoru je 0,3 Ω

Štítkové hodnoty: P=4kW, Napětí stator/rotor=380/165V

Naměřené hodnoty nakrátko: $U_k=121V$, $I_k=I_n=9,2A$, $P_k=700W$

Výpočet podélných parametrů

Příklad

Výpočet maximálního proudu

Výpočet spouštěcí impedance

Výpočet celkového spouštěcího odporu

Výpočet skutečné celkového spouštěcího odporu

Příklad

Celkový odpor v rotoru při spouštění

Výpočet počtu spouštěcích stupňů

⇒ volíme 3 spouštěcí stupně

Výpočet skutečné nesymetrie

Určení odporů
pro spouštění

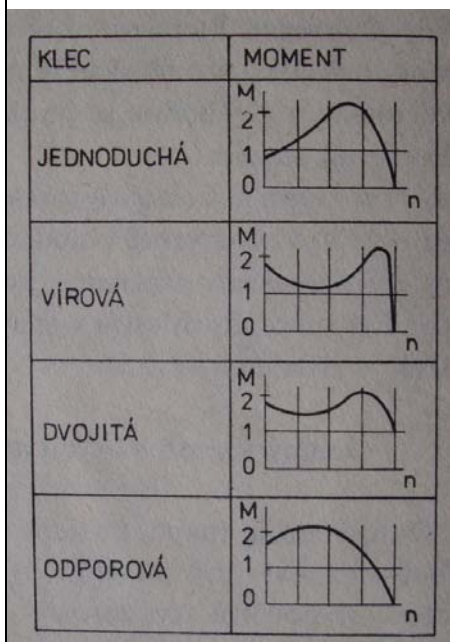
Výpočet jednotlivých
odporů

Výpočet maximálního
proudu na rotoru

Výpočet ztrátového
výkonu na spouštěči

K1

Motor s odporovou klecí



Klec rotoru je odlita z materiálu s vyšším měrným odporem (mosaz) nebo se snižuje průřez (prořezání nebo zúžení spojek).

Vlastnosti motoru:

- * snížení záběrového proudu a zvýšení záběrového momentu
- zvýšení ztrát při chodu motoru
- při větším odporu horší účinnost

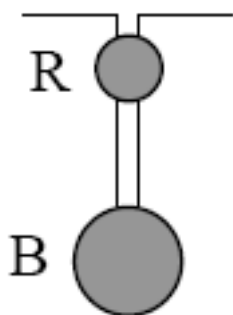
Použití:

- * motor se používá v případech s častými rozběhy náročnými na záběrový moment a krátkou dobou chodu.
- * využití – motory s krátkodobým a přerušovaným provozem (jeřáby, výtahy)

Motor s dvojitou klecí

Technologické a provozní požadavky:

- * zachovat jednoduchou konstrukci a výrobu
- * zachovat vysokou spolehlivost a minimální nároky na údržbu
- * odporový rozběh $\Rightarrow$ snížení záběrového proudu a zvýšení záběrového momentu
- * zachovat nízké ztráty a vysokou účinnost



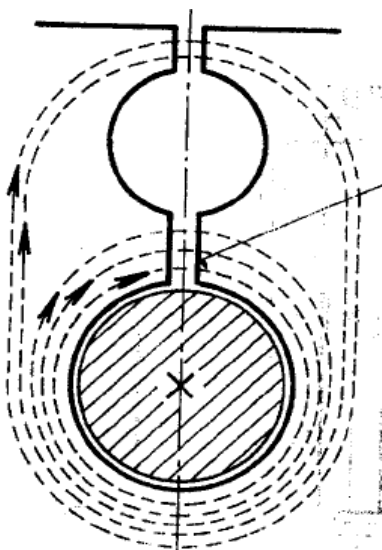
Konstrukce:

R - rozběhová klec – má menší průřez a je zhotovena z materiálu s vyšším měrným odporem (mosaz)

B - pracovní klec – má větší průřez a je zhotovena z materiálu s nižším měrným odporem (měď)

Princip

Princip je založen na rozdílné frekvenci při rozběhu a normálním běhu motoru a na rozptylové reaktanci, která je dána frekvencí.



1. Rozběh

Při rozběhu je na rotoru síťová frekvence

Spodní klec je uložena hluboko v železe (magnetickém obvodu)

$\Rightarrow$ okolo spodní klece se přes úzký, dlouhý krček uzavírá silný rozptylový magnetický tok ($X_{L\sigma} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{\sigma}$)

$\Rightarrow$ impedance spodní klece je tak velká, že jí neprochází téměř žádný proud

$\Rightarrow$ horní klec je uložena pod povrchem rotoru, rozptylový tok se přes vzduchovou mezeru neuzavře a je minimální

$\Rightarrow$ téměř veškerý proud prochází horní klecí, které má velký měrný odpor.

2. Chod

Při jmenovitých otáčkách je na rotoru minimální frekvence

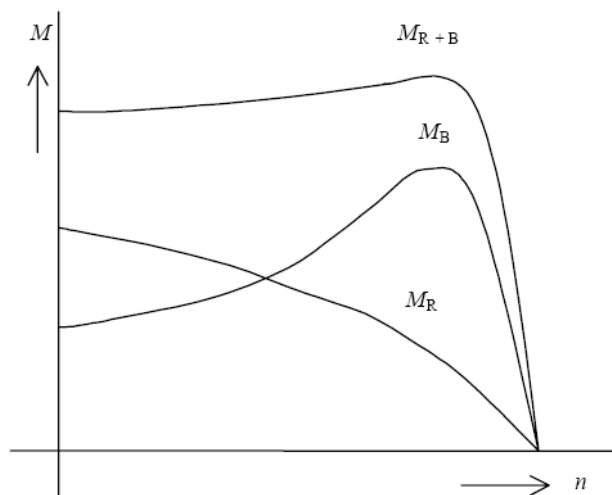
- ⇒ rozptylová reaktance je také minimální
- ⇒ proud se rozdělí v poměru odporů obou klecí
- ⇒ téměř celý proud bude procházet pracovní klecí, která má minimální odpor

Momentová charakteristika

M_R - rozběhová klec

M_B - pracovní klec

M_{R+B} - výsledná charakteristika

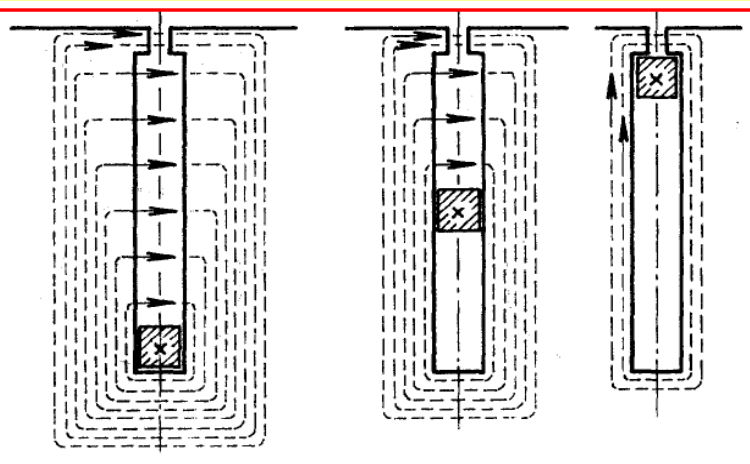


K1

Motor s vírovou klecí

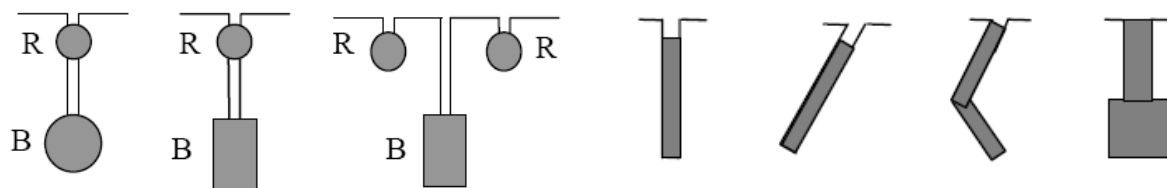
Princip je stejný jako u rotoru s dvojitou klecí

- * vírová klec je vhodná u rotorů s velkým průměrem
- * vodič v hluboké drážce si můžeme představit jako paralelně zapojené vodiče
- * v první fázi rozběhu prochází proud vlivem rozptylu pouze ve vrchní části, s rostoucími otáčkami se aktivní průřez zvyšuje



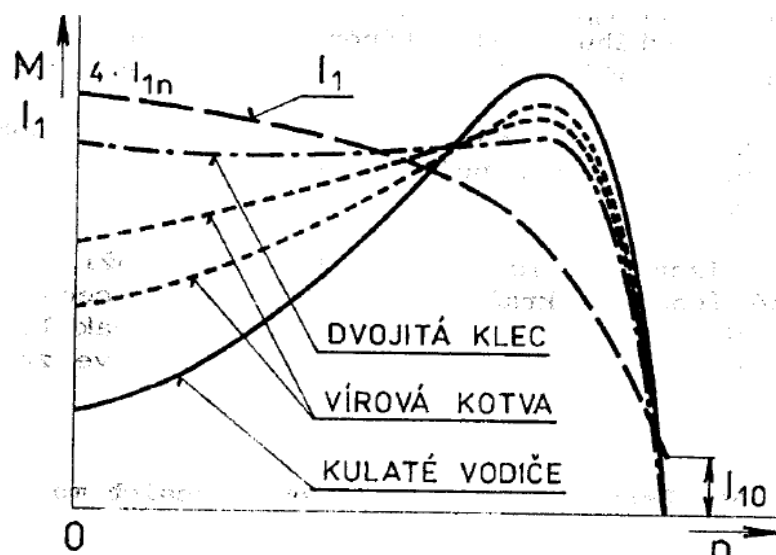
Poměr drážky – 1/5

Materiál - hliník



provedení dvojité klece

provedení vírové klece



Porovnání
momentových
charakteristik

Základní funkce motorového vývodu

Motorový vývod musí splňovat následující podmínky:

1. Odpojení a vypnutí za normálních provozních podmínek
2. Ochrana proti zkratu, přetížení a dlouhému rozběhu
3. Spínání motoru

Obecné možnosti realizace motorového vývodu:

3 přístroje:

1. Jištění - jistič, pojistka + jistící nadproudové relé, spínání – stykač
2. Jištění - motorový spouštěč s elektromagnetickou spouští + jistící nadproudové relé, spínání – stykač

2 přístroje:

3. Jištění - jistič, spínání - mechanický spínač
4. Jištění - jištěný motorový spouštěč, spínání – stykač

1 přístroj:

5. Kombinace jištěný motorový spouštěč + stykač (1 přístroj)
6. Integrál

Spínací přístroje

Kategorie užití spínacích přístrojů:

Kategorii užití spínacích přístrojů určují hodnotu proudu, který je schopen spínací přístroj vypnout nebo zapnout.

Závisí:

- * typu spínané zátěže (motor, odporník, indukční nebo kapacitní zátěž)
- * podmínkách, za kterých dochází ke spínání (normální chod motoru, brzdění, reverzace, ...)

Kategorie užití (střídavé aplikace)

Kategorie AC-1

účinník zátěže se blíží k jedné (odporové pece, tepelné spotřebiče, ...)

Kategorie AC-2

spínání kroužkových motorů a motorů s omezeným proudovým rázem na $I_z = 2,5 \cdot I_n$.

Kategorie AC-3

spínání motorů s kotvou nakrátko bez omezení záběrového proudu, $I_z = (5 - 7) \cdot I_n$.

Kategorie AC-4

brzdění protiproudem motorů, častá reverzace, popojíždění motorů, záběrový proud je $I_z = (5 - 7) \cdot I_n$.

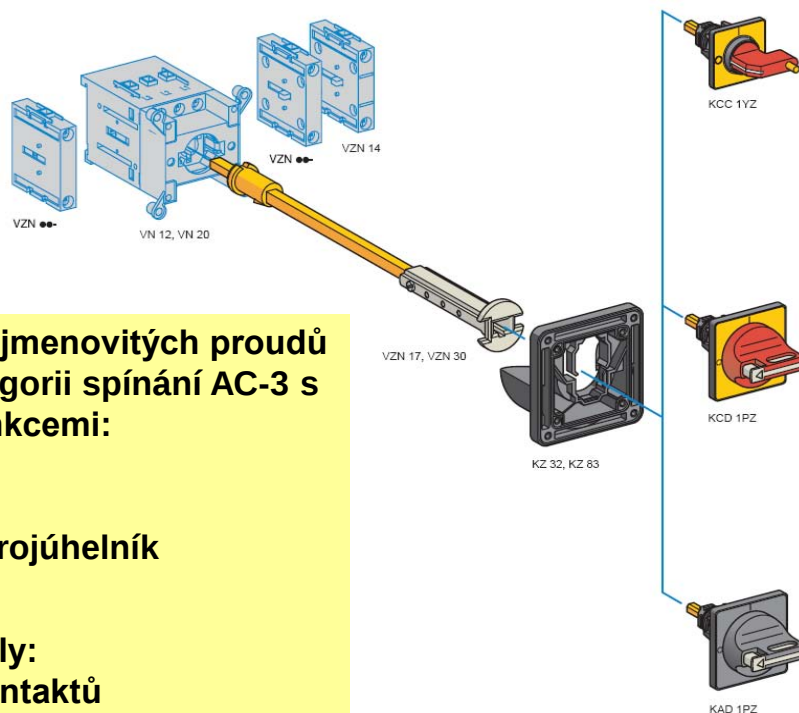
Mechanické spínače pro nižší proudy

Vyrábějí se v rozsahu jmenovitých proudů od 10 do 200 A, v kategorii spínání AC-3 s různými spínacími funkcemi:

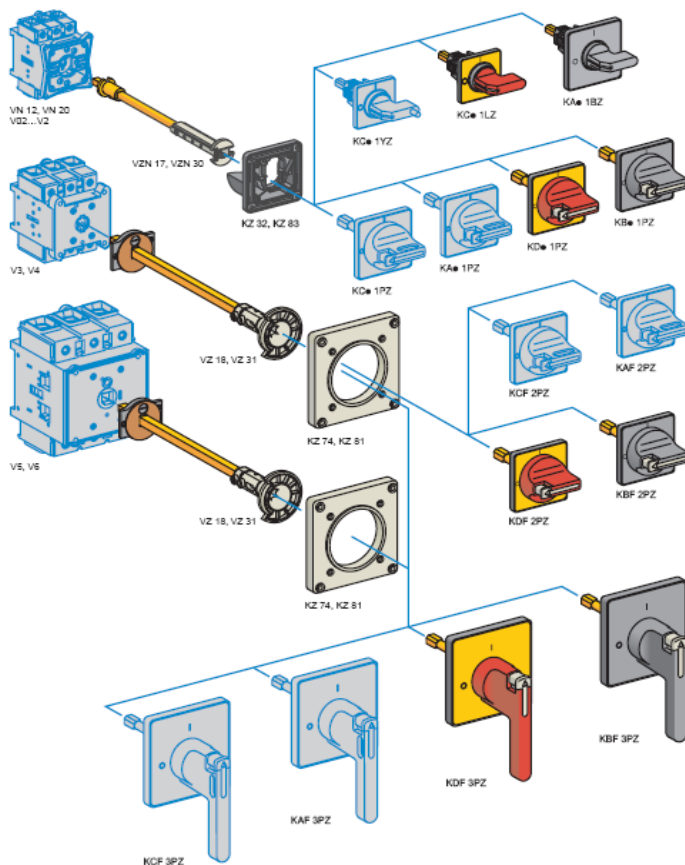
- * přímé připojení
- * reverzace
- * přepínač hvězda – trojúhelník
- * obecné přepínače

Běžné přídatné moduly:

- * blok pomocných kontaktů



Mechanické spínače pro vyšší proudy



Kombinace stykač – jistič

Koordinace stykače s přístroji chránící před zkratem

- * je klíčová z pohledu spolehlivosti motorového vývodu.
- * určuje volbu přístrojů
- * u komplexního přístroje (zahrnuje jak spínací, tak i chránící funkci) se koordinace neřeší, je zajištěna výrobcem přístroje

Možnosti koordinace:

Koordinace typu 1

vyžaduje, aby při zkratu stykač nebo spouštěč nezpůsobil nebezpečí pro osoby a instalaci. Při zkratu dojde k poškození stykače nebo spouštěče a je nutná jeho výměna.

Koordinace typu 2

vyžaduje, aby při zkratu stykač nebo spouštěč nezpůsobil nebezpečí pro osoby a instalaci a byl vhodný pro další používání. Při zkratu může ale dojít ke svaření kontaktů stykače nebo spouštěče.

Úplná koordinace

Nesmí dojít k žádnému poškození kontaktů

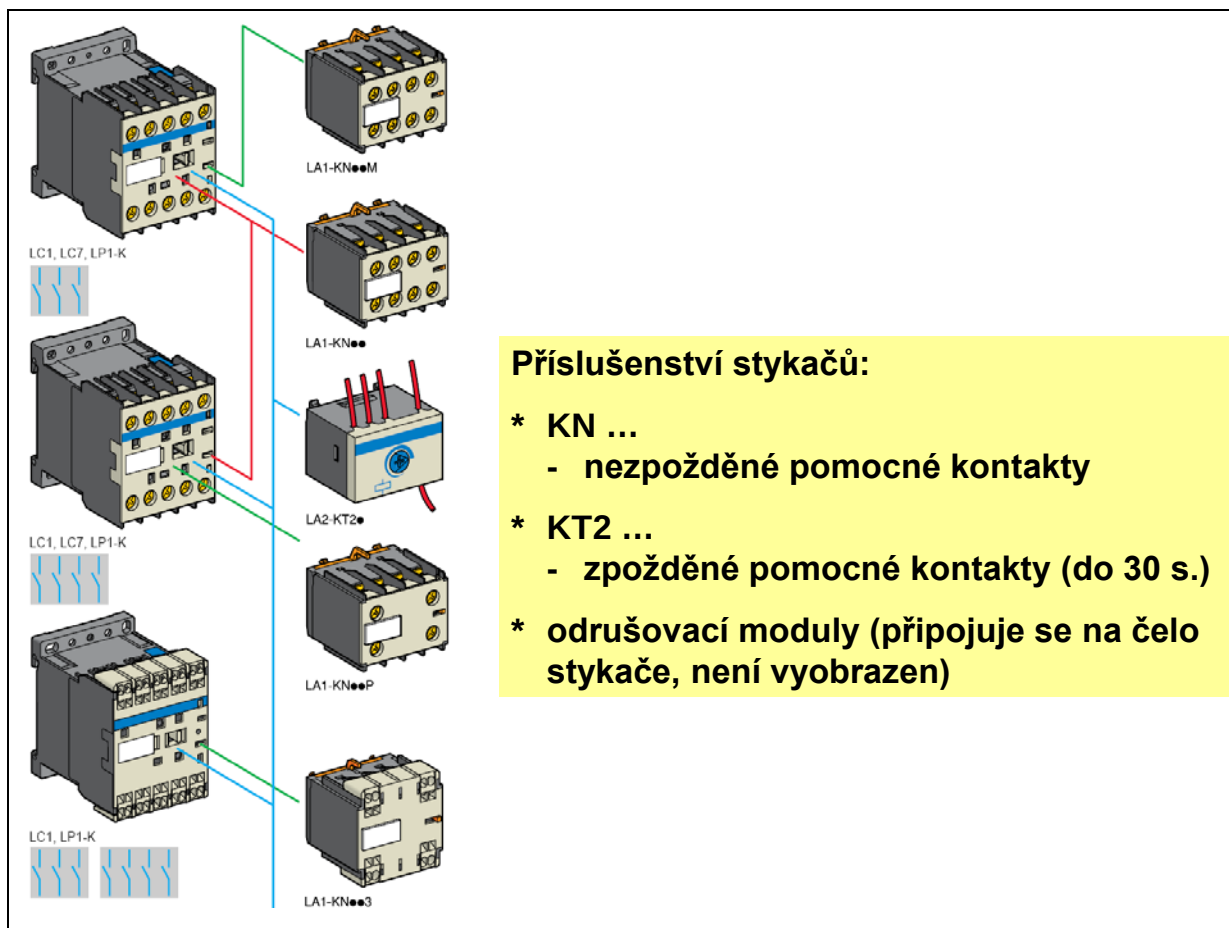
Koordinace typu 1 – malé výkony

- * pro výkony do 5,5 kW
- * kombinace obsahuje
 - motorový spouštěč
 - stykač
- * možnost nastavení
 - nastavení tepelné spouště
- * zkratová spoušť je pevně nastavena, vypínací schopnost 50 kA



Příklad: motor 4 kW, napětí 400 V, pracovní proud stykače 9A, vypínací schopnost stykače 110 A

Jmenovité výkony třífázových motorů 50/60 Hz AC-3			Nastavení tepelné spouště	Pevné nastavení zkratové spouště 13 I _{rt}	Pro montáž uživatelem	
400/ 415V 440V 500V					Motorový jistič Typové označení	Stykač Typové označení nutno doplnit (3)
kW	kW	kW	A	A		
3	—	4	6...10	138	GV2-ME14	LC1-K09
4	4	5.5				



Koordinace typu 2 – střední výkony

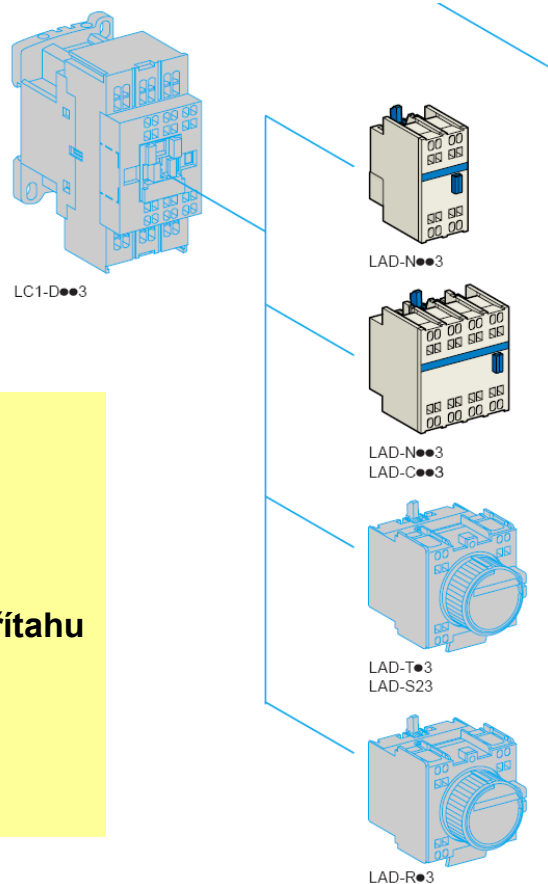
- * pro výkony do 15 kW
- * kombinace obsahuje
 - motorový spouštěč
 - stykač
- * možnost nastavení
 - nastavení tepelné spouště
- * zkratová spoušť je pevně nastavena



Příklad: motor 9 kW, napětí 400 V, pracovní proud stykače 25 A, vypínací schopnost stykače 450 A

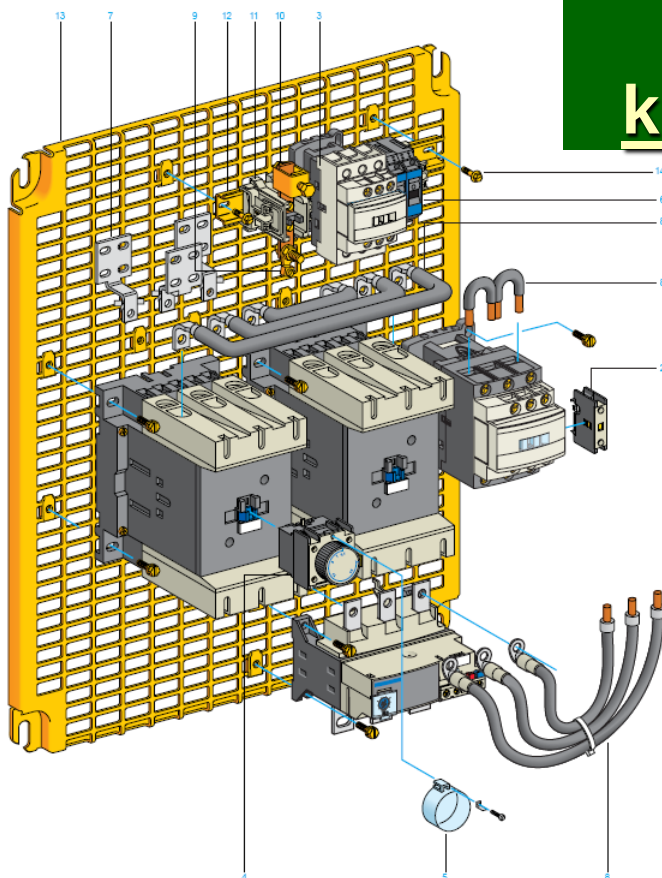
Jmenovité výkony třífázových motorů 50/60 Hz AC-3	Nastavení tepelné spouště	Pevné nastavení zkratové spouště 13 Irth	Pro montáž uživatelem	
			Motorový jistič Typové označení	Stykač Typové označení nutno doplnit (2)
400/ 415V 440V 500V				
kW	kW	kW	A	A
9	11	11	17...23	327
			GV2-P21	LC1-D25●●

animace sestavení stykačů



Příslušenství stykačů:

- * LAD-N (LAD-C) ...
 - nezpožděné pomocné kontakty
- * LAD-T (LAD-S, LAD-R) ...
 - zpožděné pomocné kontakty při přitahu nebo odpadu (podle typu do 180 s.)
- * blok mechanického blokování (není vyobrazen)
- * bloky s ochranou proti přepětí



Stykačová kombinace Y/D

Úplná koordinace

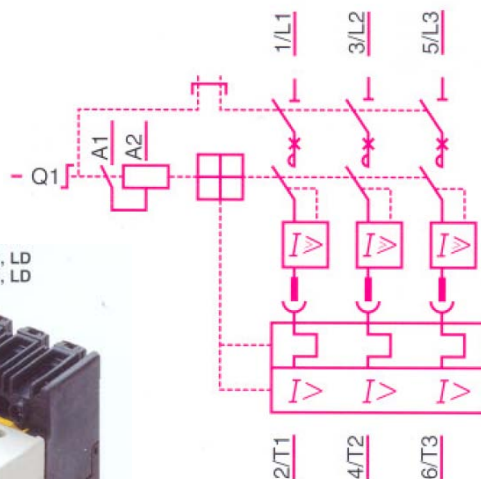
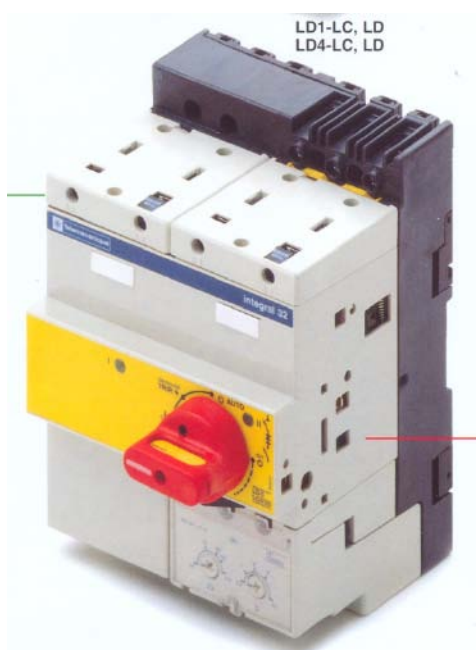
- * jeden přístroj, který zajišťuje všechny funkce – spínání a jištění
- * vypínací schopnost ≥ 130 kA
- * v kombinaci i pro reverzaci
- * možnost nastavení spouští (podle jednotlivých typů)
- * možnost testování jednotlivých funkcí spínače
- * funkce odpojovače (mechanické blokování proti sepnutí)
- * možnost příslušenství
 - bloky pomocných a signalizačních kontaktů
 - možnost připojení modulů na vstup pro ovládání (podpěťová spoušť, ...)



Telemecanique

Multifunkční spouštěč motoru Ultima

Integrál 32 provedení s odpojovačem



Úvod do problematiky

Regulace otáček je podle rozsahu použití jeden z hlavních požadavků na chod pohonu.

Obtížná regulace otáček patřila, v porovnání se stejnosměrnými motory, k základním nevýhodám indukčních motorů.

Rozvoj výkonové elektroniky umožňuje nahrazovat stejnosměrné pohony indukčními motory

Jaké jsou možnosti regulace otáček?

1. Změnou frekvence – plynulá regulace, měnič frekvence
2. Změnou počtu pólů – skoková regulace, speciální motor
3. Změnou skluzu – plynulá regulace, kroužkový motor, složité
4. Změnou napětí (změna momentové charakteristiky - $M \sim U^2$) – malý rozsah regulace, minimální využití

Regulace změnou napětí

je založena na změně tvaru momentové charakteristiky se změnou napětí s následným posunutím pracovního bodu.

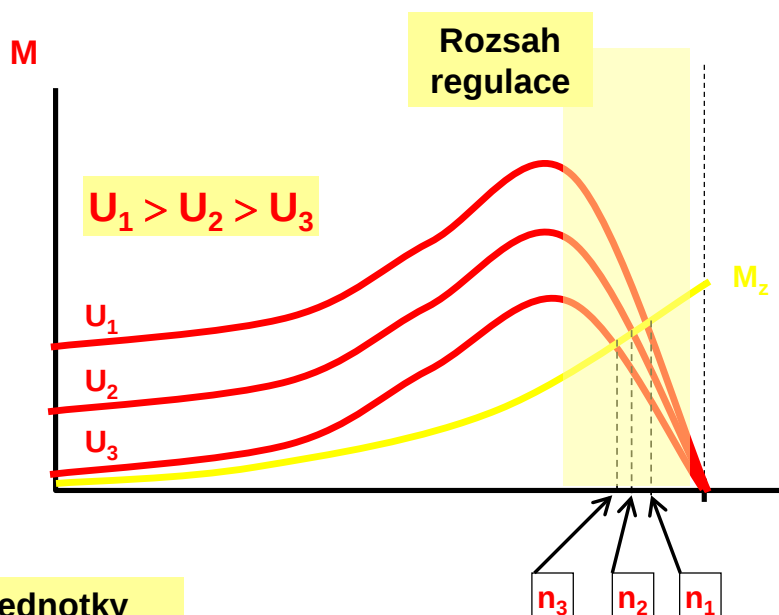
Vlastnosti:

- * nutný střídavý měnič napětí
- * regulace je plynulá
- * teoretický rozsah regulace $s_{zv} > s > 0 \Rightarrow$ minimální rozsah regulace

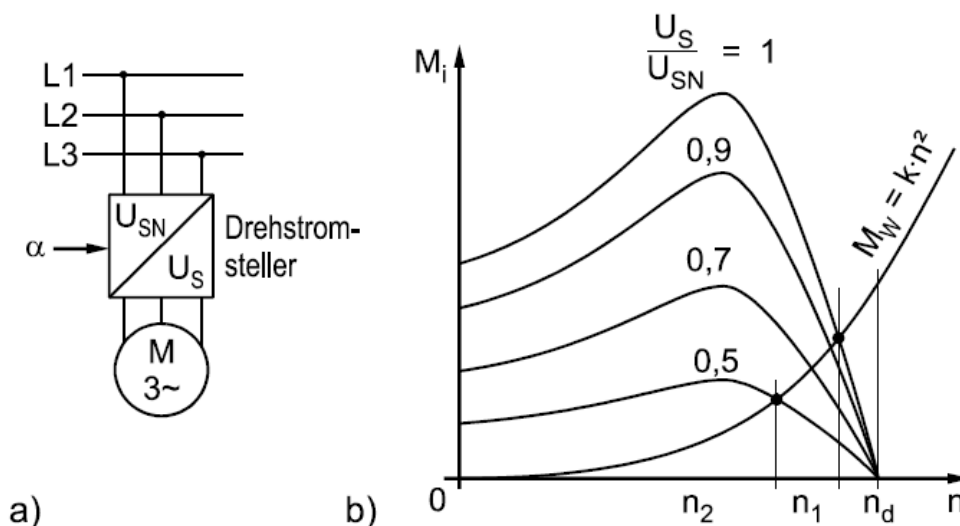
Jak lze zvýšit rozsah regulace ?

použitím odporové klece se zvyšuje skluz zvratu, ale rostou ztráty

Použití - ventilátorové jednotky



Regulace změnou napětí



Regulace změnou počtu pólů

Zvýšením počtu pólů klesají otáčky. K regulaci je nutný speciální motor

Možnosti provedení motoru:

*** zpravidla dvě, výjimečně tři samostatná vinutí**

- možnost libovolné kombinace otáček, ale větší hmotnost motoru

Jmenovitý výkon		Velikost	Objednací číslo	Parametry při jmenovitém výkonu		Poměrný záběrový moment Mz/Mn		Poměrný záběrový proud Ik/In		Poměrný moment zvratu Mmax/Mn		
			Označení pro napětí a tvar viz tabulka na str. 18	Otáčky	Jmenovitý proud při 400V	Při přímém spouštění						
1000 min ⁻¹	1500 min ⁻¹			min ⁻¹	1000 min ⁻¹	1500 min ⁻¹	1000 min ⁻¹	1500 min ⁻¹	1000 min ⁻¹	1500 min ⁻¹	1000 min ⁻¹	1500 min ⁻¹
6/4pól, 1000/1500 min ⁻¹ , 50Hz												
kW	kW				A	A	-	-	-	-	-	-
0,12	0,4	80	1LA7 080-1BD..	940/1430	0,51	1,38	1,7	1,7	2,8	4,0	1,8	2,0
0,18	0,55	80	1LA7 083-1BD..	930/1420	0,73	1,62	1,5	1,7	2,5	4,0	1,8	2,0
0,29	0,8	90S	1LA7 090-1BD..	950/1430	1,05	2,1	1,5	1,5	3,4	4,3	2,0	2,0
0,38	1,1	90L	1LA7 096-1BD..	955/1430	1,35	2,65	1,8	1,8	3,8	4,9	2,3	2,3
0,6	1,7	100L	1LA7 106-1BD..	950/1420	1,75	3,8	1,8	1,8	4,2	5,2	2,2	2,2
0,7	2,1	100L	1LA7 107-1BD..	950/1420	2,30	4,55	1,6	1,9	3,9	5,2	2,0	2,2
0,9	3	112M	1LA7 113-1BD..	980/1450	3,0	6,7	2,0	2,1	4,5	6,1	2,5	2,5
1,2	3,9	132S	1LA7 130-1BD..	975/1460	3,5	8,4	1,9	1,7	5,1	6,1	2,5	2,2
1,7	5,4	132M	1LA7 133-1BD..	975/1460	4,55	11,4	2,1	1,9	5,1	6,6	2,6	2,5
2,5	7,2	160M	1LA7 163-1BD..	980/1470	6,4	14,4	1,9	2,0	5,6	7,3	1,9	2,0
3,7	12	160L	1LA7 166-1BD..	980/1470	9,3	23,3	1,9	2,4	5,7	8,1	2,3	3,0

Možnosti provedení motoru:

* vinutí s vyvedeným středem

- možnost pouze maximálních a polovičních otáček
- nižší hmotnost motoru

Dvouotáčkové motory s jedním vinutím v provedení Dahlander D/YY

Jmenovitý výkon		Velikost	Objednací číslo	Parametry při jmenovitém výkonu			Poměrný záběrový moment		Poměrný záběrový proud		Poměrný moment zvratu	
				Označení pro napětí a tvar viz tabulka níže	Otáčky	Jmenovitý proud při 400V	Mz/Mn	Ik/In	Mmax/Mn			
1500 min ⁻¹	3000 min ⁻¹			min ⁻¹	1500 min ⁻¹	3000 min ⁻¹	1500 min ⁻¹	3000 min ⁻¹	1500 min ⁻¹	3000 min ⁻¹	1500 min ⁻¹	3000 min ⁻¹
4/2pól, 1500/3000 min ⁻¹ , 50Hz							Při přímém spouštění					
kW	kW				A	A	-	-	-	-	-	-
0,1	0,15	63	1LA7 060-0AA..	1330/2650	0,41	0,51	1,8	1,8	2,7	2,9	1,8	1,8
0,15	0,2	63	1LA7 063-0AA..	1330/2700	0,51	0,58	2,0	2,0	3,0	3,3	2,0	2,0
0,21	0,28	71	1LA7 070-0AA..	1330/2700	0,70	1,1	1,6	1,6	3,0	3,1	1,8	1,8
0,3	0,43	71	1LA7 073-0AA..	1380/2770	0,89	1,3	1,8	1,8	3,7	3,8	2,0	2,0
0,48	0,6	80	1LA7 080-0AA..	1390/2810	1,25	1,6	1,7	1,7	3,9	4,0	2,0	2,0
0,7	0,85	80	1LA7 083-0AA..	1390/2810	1,75	2,1	1,8	1,8	4,3	4,3	2,1	2,1
1,1	1,4	90S	1LA7 090-0AA..	1390/2810	2,7	3,6	1,6	1,8	4,2	4,3	1,9	2,0
1,5	1,9	90L	1LA7 096-0AA..	1390/2845	3,4	4,5	1,9	1,9	4,9	5,3	2,0	2,1
2	2,4	100L	1LA7 106-0AA..	1400/2850	4,3	5,7	1,8	1,8	5,0	5,5	2,0	2,1
2,6	3,1	100L	1LA7 107-0AA..	1400/2850	5,5	7,6	2,3	2,4	5,6	5,6	2,4	2,4
3,7	4,4	112M	1LA7 113-0AA..	1420/2885	8,0	10,5	2,0	2,2	5,6	5,8	2,2	2,3
4,7	5,9	132S	1LA7 130-0AA..	1450/2920	9,8	12,5	1,7	1,6	6,3	6,5	2,2	2,2

Dvouotáčkové motory (pro ventilátory)

Dvouotáčkové motory s jedním vinutím v provedení Dahlander Y/YY

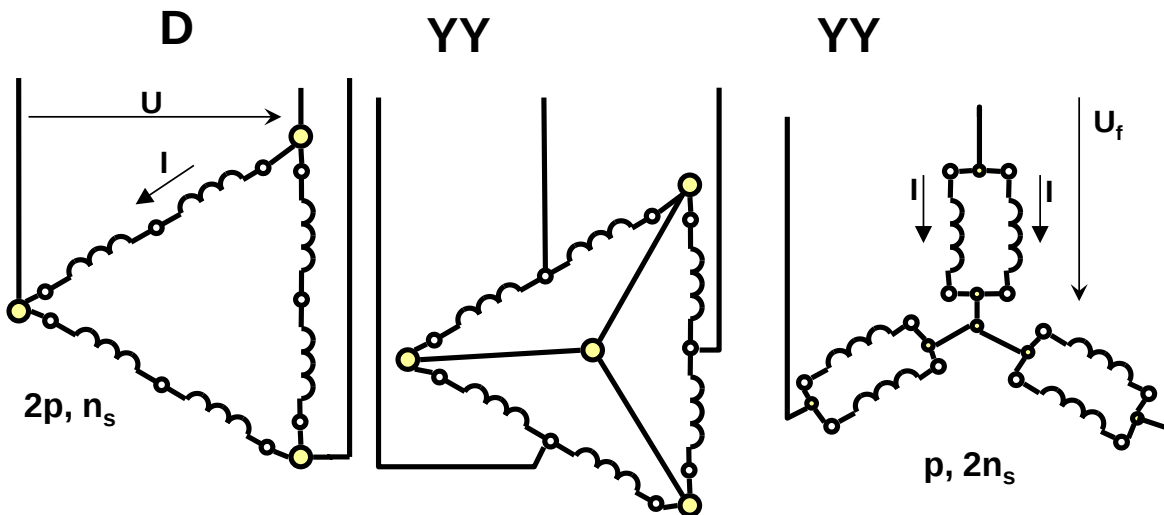
Jmenovitý výkon		Velikost	Objednací číslo	Parametry při jmenovitém výkonu			Poměrný záběrový moment Mz/Mn		Poměrný záběrový proud Ik/In		Poměrný moment zvratu Mmax/Mn	
			Označení pro napětí a tvar viz tabulka na str. 18	Otáčky	Jmenovitý proud při 400V		Při přímém spouštění					
750 min ⁻¹	1500 min ⁻¹			min ⁻¹	750 min ⁻¹	1500 min ⁻¹	750 min ⁻¹	1500 min ⁻¹	750 min ⁻¹	1500 min ⁻¹	750 min ⁻¹	1500 min ⁻¹
8/4pól, 750/1500 min ⁻¹ , 50Hz												
kW					A	A	-	-	-	-	-	-
0,1	0,5	80	1LA7 080-0BB..	680/1375	0,57	1,28	1,4	1,7	2,3	4,1	1,7	1,8
0,15	0,7	80	1LA7 083-0BB..	685/1380	0,77	1,76	1,4	1,8	2,4	4,2	1,7	1,8
0,22	1	90S	1LA7 090-0BB..	695/1370	1,25	2,4	1,3	1,5	2,4	3,7	1,8	2,0
0,33	1,5	90L	1LA7 096-0BB..	700/1380	1,8	3,3	1,5	1,8	2,6	4,2	1,8	2,0
0,5	2	100L	1LA7 106-0BB..	700/1400	2,5	4,25	1,1	1,9	3,1	5,2	1,8	2,1
0,65	2,5	100L	1LA7 107-0BB..	700/1400	2,8	5,3	1,1	1,9	3,1	5,4	1,8	2,1
0,9	3,6	112M	1LA7 113-0BB..	710/1435	4,5	8,0	1,6	2,6	3,2	6,5	2,4	2,6
1,1	4,7	132S	1LA7 130-0BB..	720/1455	3,3	10,3	2,0	2,3	4,3	6,4	2,5	2,9
1,4	6,4	132M	1LA7 133-0BB..	720/1455	4,4	13,3	2,2	1,9	4,6	6,8	2,7	2,5
2,2	9,5	160M	1LA7 163-0BB..	725/1465	6,5	19,7	1,7	2,0	4,1	7,0	2,0	2,6
3,3	14	160L	1LA7 166-0BB..	730/1470	9,3	28,6	2,0	2,6	4,7	8,1	2,2	3,1

Přepínání D/YY

Za předpokladu stejného účinníku a zanedbaných ztrát platí:

$$P_D = 3 \cdot \sqrt{3} \cdot U_f \cdot I \cdot \cos \varphi \quad P_{YY} = 3 \cdot U_f \cdot 2 \cdot I \cdot \cos \varphi \quad \Rightarrow \quad P_{YY} \cong P_D$$

$\Rightarrow$ přepínání při přibližně konstantním výkonu



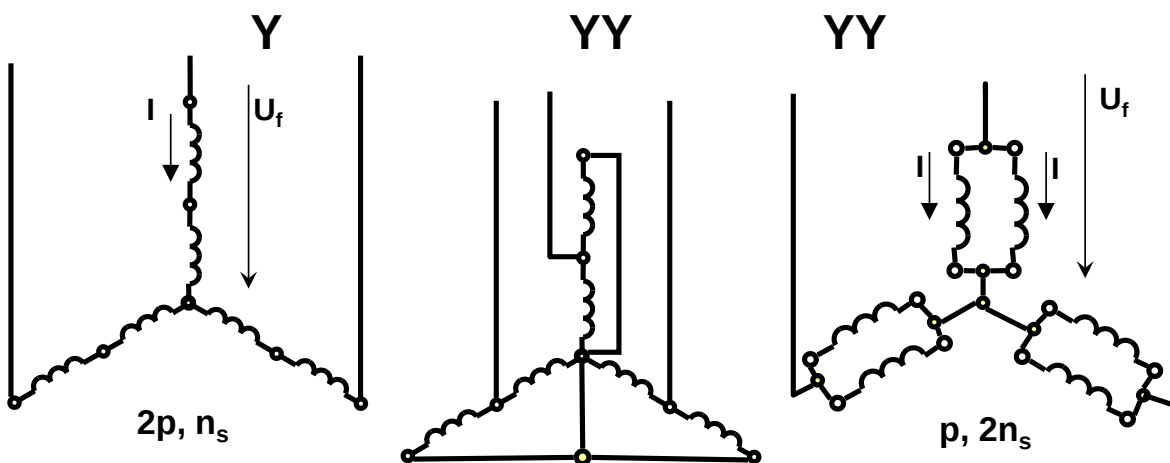
Přepínání Y/YY

Za předpokladu stejného účinníku a zanedbaných ztrát platí:

$$P_Y = 3 \cdot U_f \cdot I \cdot \cos \varphi \quad P_{YY} = 3 \cdot U_f \cdot 2 \cdot I \cdot \cos \varphi \quad \Rightarrow \quad P_{YY} \cong 2 \cdot P_Y$$

$\Rightarrow M_{YY} \cong M_Y$

$\Rightarrow$ přepínání při přibližně konstantním momentu



Regulace změnou skluzu

U jakých indukčních motorů lze regulaci provádět ?

Pouze u kroužkových motorů.

Možná realizace:

- * změna odporu ve vinutí rotoru - ztrátová regulace $\Rightarrow$ neprovádí se
- * změna napětí na vinutí rotoru - s rozvojem měničů kmitočtu postupně ztrácí na významu $\Rightarrow$ omezené využití u starších pohonů
 - podsynchronní kaskáda
 - regulace do synchronních otáček
 - nadsynchronní kaskáda
 - možnost i nadsynchronních otáček

Podsynchronní kaskáda

U jakých indukčních motorů lze regulaci provádět ?

Pouze u kroužkových motorů.

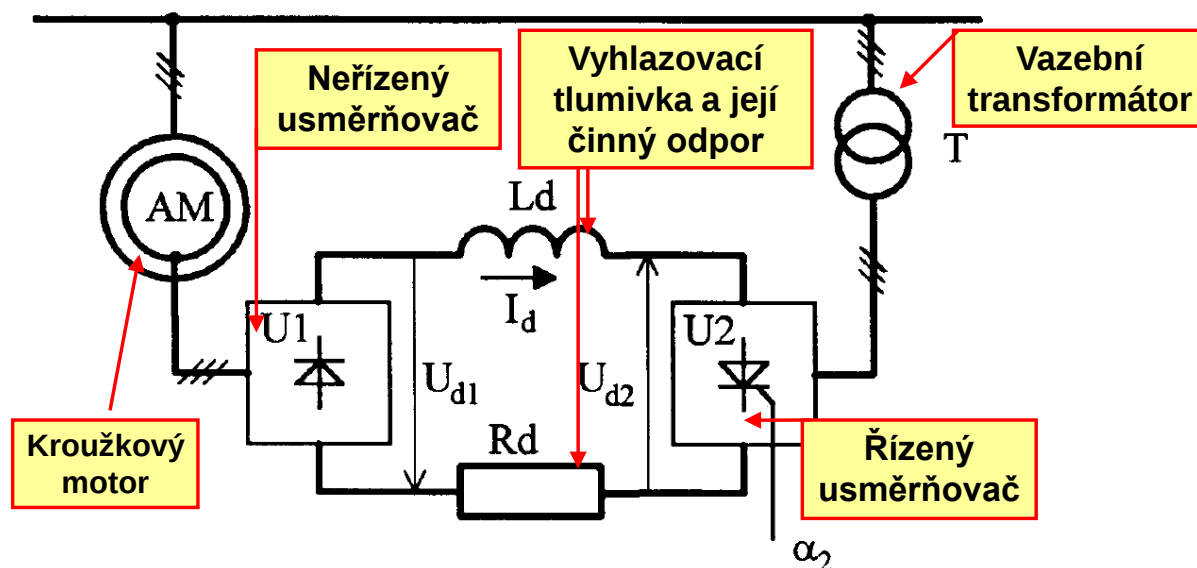
Možná realizace:

- * změna odporu ve vinutí rotoru - ztrátová regulace $\Rightarrow$ neprovádí se
- * změna napětí na vinutí rotoru - s rozvojem měničů kmitočtu postupně ztrácí na významu $\Rightarrow$ omezené využití u starších pohonů

Použití: regulace otáček pohonů s velkými výkony

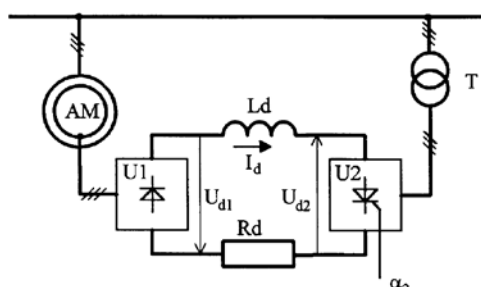
- podsynchronní kaskáda
- regulace do synchronních otáček
- nadsynchronní kaskáda
- možnost i nadsynchronních otáček

Zapojení podsynchronní kaskády



- * rotorové vinutí je připojeno přes kroužky na neřízený usměrňovač U_1
- * ve stejnosměrném meziobvodu je zařazena tlumivka (L_d , R_d), která vyhladí průběh proudu
- * rychlost motoru se řídí změnou řídicího úhlu α_2

Princip podsynchronní kaskády



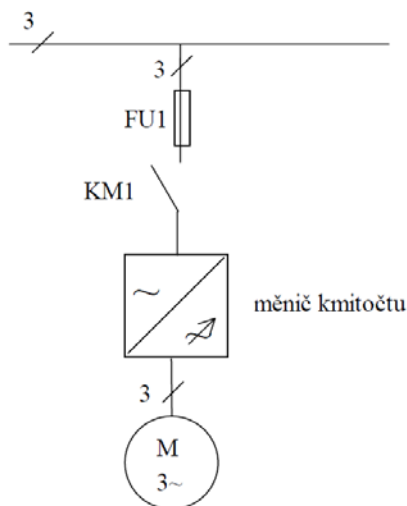
jelikož $s > 0 \Rightarrow \cos \alpha_2 < 0 \Rightarrow 90^\circ < \alpha_0 < 150^\circ$
(řízený usměrňovač je v invertorovém režimu)

Provoz podsynchronní kaskády:

- * maximální skluz (minimální otáčky) je pro maximální úhel otevření α_2
- * pro $\alpha_2 = 90^\circ$ ($\cos \alpha_2 = 0$) odebírá řízený usměrňovač ze sítě pouze jalový výkon $\Rightarrow$ účinník celého pohonu se výrazně zhoršuje
- * pro zlepšení účinníku se omezuje rozsah regulace

Regulace otáček změnou frekvence

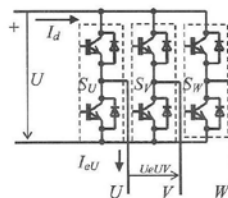
- * v současné době nejrozšířenější způsob regulace
- * rozvoj polovodičové techniky umožňuje použití pro vyšší výkony, snižování hmotnosti a ztrát měničů



Mezi AM a napájecí síť je zapojen trojfázový měnič kmitočtu

Provedení:

- Přímý měnič kmitočtu – cyklokonvertor
- Nepřímý měnič kmitočtu – (usměrňovač, stejnosměrný meziobvod a střídač



Regulace otáček změnou frekvence

Momentová charakteristika:

Ze základních vztahů indukčního motoru lze odvodit závislost mezi otáčkami a momentem:

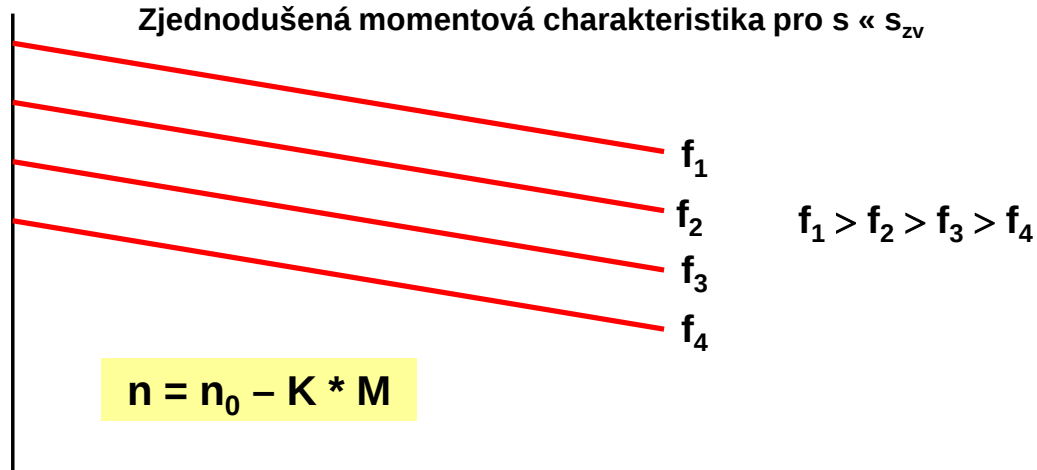
$$n = n_0 - K * M$$

Platí za předpokladu:

R_1 (odpor vinutí statoru) $\rightarrow 0$
pracovní rozsah skluzů $s \ll s_{zv}$

Momentová charakteristika odpovídá mechanické charakteristice stejnos. motoru s cizím buzením

Zjednodušená momentová charakteristika pro $s \ll s_{zv}$



Zásady kmitočtového řízení

Kmitočtová regulace je rozdělena do dvou úseků:

1. Regulace s konstantním buzením

Je-li podíl napětí a řídicího kmitočtu (U/f) konstantní, je buzení konstantní.

Tento způsob regulace se uplatní v první fázi regulace, od minimálních otáček do jmenovitých otáček motoru kdy platí:

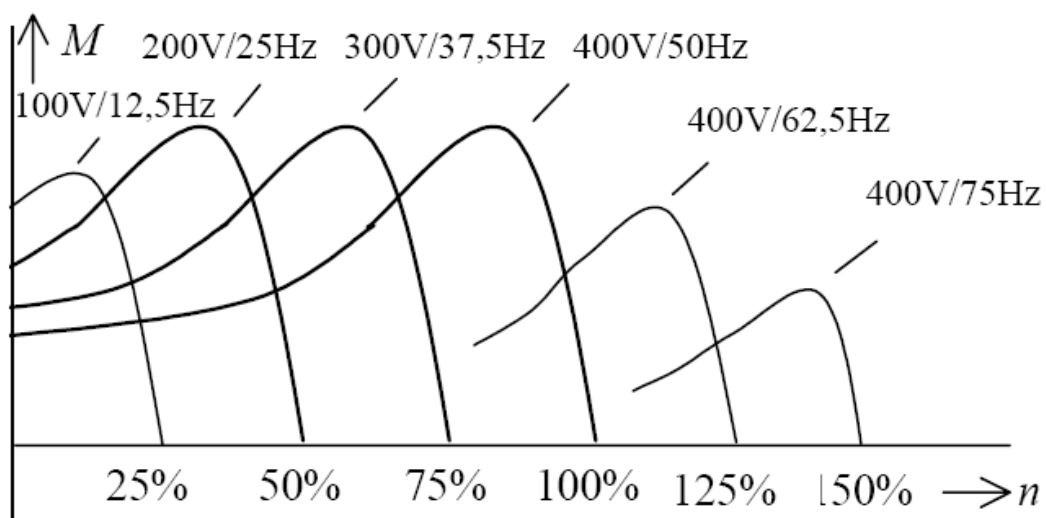
$f = 50\text{Hz}$ a $U = U_n$ (400 V)

2. Regulace s odbuzováním motoru

Při dalším zvyšování frekvence ($f > f_{1n}$) již nelze zvyšovat napětí a roste pouze frekvence

$$\phi \sim 1/f_1 \Rightarrow M \sim 1/f_1$$

Momentové charakteristiky při skalárním řízení



Zásady kmitočtového řízení za předpokladu konstantního proudu

Problematika regulace

1. Při nízkých otáčkách motoru a závislém chlazení (ventilátor je na hřídeli motoru) se motor špatně chladí (ventilátorová charakteristika). Při jmenovitém zatížení motoru hrozí tepelné poškození.
Řešení – nezávislé chlazení
2. Při vysokých otáčkách rostou vlivem vysoké frekvence ztráty vířivými proudy $\Rightarrow$ zhoršení účinnosti motoru a zvýšené tepelné namáhání
3. Při použití běžných motorů je maximální frekvence zhruba $f = 2 \cdot f_n$, u speciálních motorů lze nastavit frekvenci $f = 10 \cdot f_n$ (podle možnosti měniče frekvence)
4. U náročných aplikací je nutno uvažovat zpětný vliv měničů na síť a problematiku elektromagnetické kompatibility (EMC),

Základní struktury měničů

1. skalární řízení

- * v principu může měnič pracovat samostatně (nedoporučuje se, ale u starších měničů to bylo možné)
- * výstupní veličiny pro řízení je velikost napětí a kmitočtu
- * zpětná vazba není podmínkou činnosti měniče
- * vhodné pro pohony s malými nároky na dynamiku (čerpadla, ventilátory)

2. vektorové řízení

- * u stejnosměrných motorů s cizím buzením můžeme samostatně a nezávisle regulovat buzení (budící vinutí) a napětí na kotvě
- * vektorové řízení umožňuje přiblížit vlastnosti regulace indukčních motorů ke stejnosměrným motorům za využití výhody jednodušší konstrukce indukčního motoru
- * podmínkou pro vektorové řízení je
 1. propojení měniče s motorem (motor musí být připojen k měniči), na základě kterého si měnič vypočítá parametry motoru
 2. aktuální informace o okamžité pozici rotoru (magnetického pole)

Základní nastavení měničů

1. možnosti přístupu

- * uživatelský - umožňuje základní funkce měniče
- * programátorský - nastavení parametrů motoru a měniče
- * servisní - pro servisní organizaci

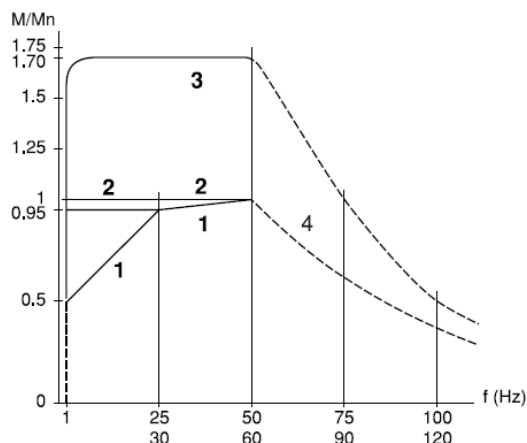
2. způsoby ovládání

- * místně z klávesnice
- * pomocí sériové linky
- * přes PLC
- * analogově proudovou smyčkou

3. možnosti nastavení (výběr)

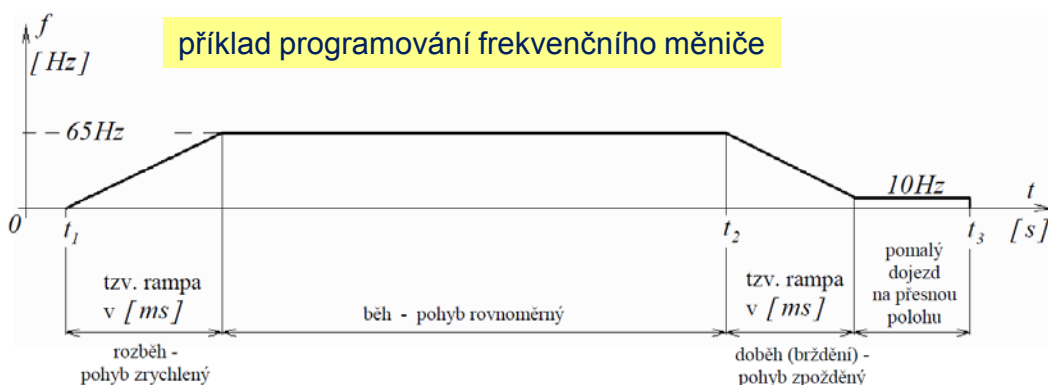
- a) nastavení parametrů motoru
- b) nastavení ochran motoru a měniče
- c) způsob ovládání
- d) způsob rozběhu
 - podle charakteru zátěže
 - podle časových požadavků
- e) omezení regulace
 - minimální a maximální frekvence
 - počáteční frekvence
 - omezení mechanické rezonance
- f) způsob doběhu
 - plynulý (řízený) doběh
 - dynamická brzda

Typické průběhy :

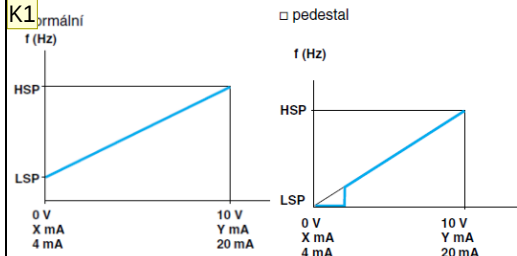


- 1 Motor s vlastním chlazením : trvalý moment
- 2 Motor s cizím chlazením : trvalý moment
- 3 Krátkodobé momentové přetížení 60 s
- 4 Moment motoru v oblasti konstantního výkonu.

Momentové přetížení
200 % jmenovitého momentu motoru po dobu 2 s
a 170 % po dobu 60 s.

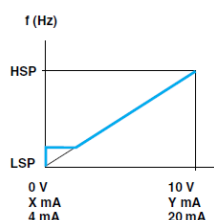


K1

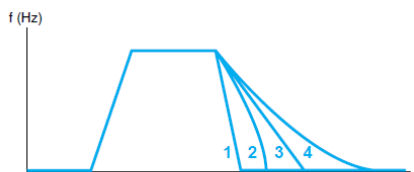


Pracovní rozsah otáček

□ deadband



Možnosti zastavení

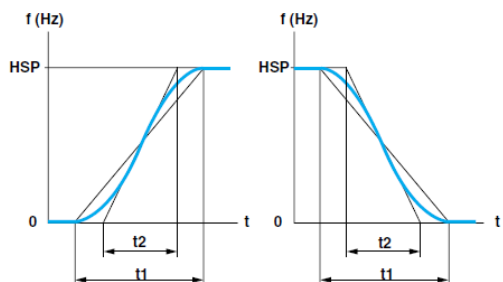


- 1 Rychlé zastavení
- 2 Stejněměrné brždění
- 3 Zastavení po doběhové rampě
- 4 Volný doběh

Příklady možných typů zastavení

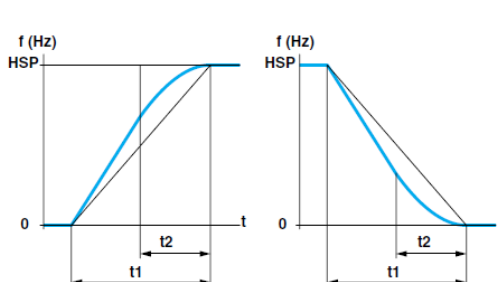
Nastavení rampy

□ tvar rampy S



HSP: vysoké otáčky.
Koeficient zakřivení je pevný: $t_2 = 0,6 \times t_1$,
kde t_1 je doba trvání rampy.

□ tvar rampy U



HSP: vysoké otáčky.
Koeficient zakřivení je pevný: $t_2 = 0,5 \times t_1$,
kde t_1 je doba trvání rampy.

Brzdění indukčního motoru

Možnosti brzdění:

1. Mechanicky
 - čelist'ová brzda
 - pásová brzda
2. Elektricky
 - protiproudem
 - rekuperační
 - stejnosměrným proudem (dynamické)

Volba způsobu elektrického brzdění je dána:

1. Typem zátěže
 - aktivní
 - pasivní
2. Momentem setrvačnosti zátěže
3. Požadavkem na dynamiku brzdění
4. Způsobem napájení motoru

Brzdění protiproudem – pasivní zátěž

Princip:

1. Změna pořadí fází napájení indukčního motoru (reverzace)
 - skluz je v rozsahu $1 < s < 2$
 - pracovní charakteristika motoru přejde do 3 kvadrantu
 - proud motoru odpovídá zhruba záběrnému proudu
2. Zastavení motoru při nulových otáčkách
 - po zastavení motoru je třeba odpojit motor od sítě (jinak by se roztočil na opačnou stranu). K odpojení se používá snímač nulových otáček (např. ALNICO – mechanické relé)

Výhody:

- rychlost, jednoduchost

Nevýhody:

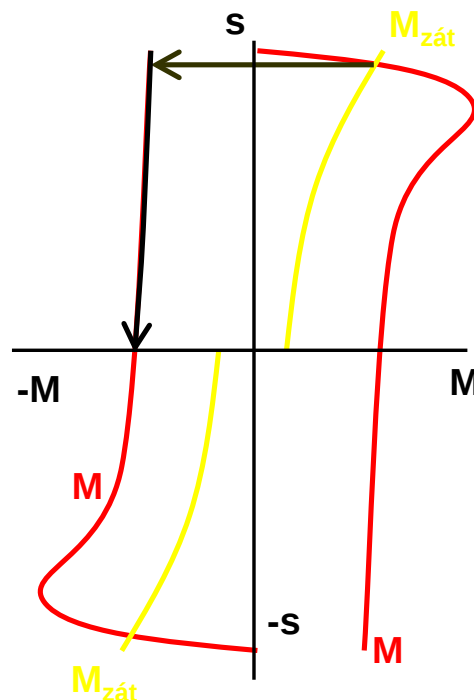
- velký proudový ráz
- omezení u aktivního momentu
- nelze ovlivnit rychlost zastavení

Brzdění protiproudem – pasivní zátěž

Pracovní bod motorického režimu pro danou zátěž
 $s \cong 0$

Okamžik reverzace - $s \cong 2$

1. Přejít na novou momentovou charakteristiku
2. Po nové charakteristice postupné snižování otáček
3. Zastavení při nulových otáčkách (elektrické odpojení motoru od sítě)



K1

Brzdění protiproudem – aktivní zátěž

Pro aktivní zátěž (jeřáb) musí být kroužkový motor !

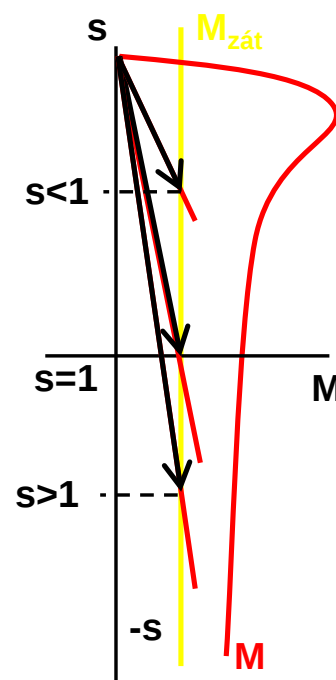
1. Zařazení dostatečně velkého odporu do obvodu vinutí rotoru
2. Rotor se pohybuje pomaleji, ve směru magnetického pole ($s < 1$)

nebo

2. Zvýšení odporu ve vinutí rotoru
3. Rotor se zastaví ($s = 1$)
4. Mechanické zabrzdění pohonu
5. Elektrické odpojení motoru od sítě

nebo

2. Další zvýšení odporu ve vinutí rotoru
3. Břemeno se pohybuje proti smyslu točivého pole ($s > 1$)



Brzdění rekuperační

Využití zejména u aktivní zátěže.

Princip:

Motor se otáčí nadsynchronními otáčkami:

- a) působením zátěže
- b) snížením napájecího kmitočtu

Motor pracuje jako indukční generátor ($s < 0$) $\Rightarrow$ dodává do sítě činný výkon, za sítě odebírá jalový výkon.

Podmínka pro činnost:

Měnič frekvence musí mít schopnost invertorového chodu (dodávat činnou energii do sítě).

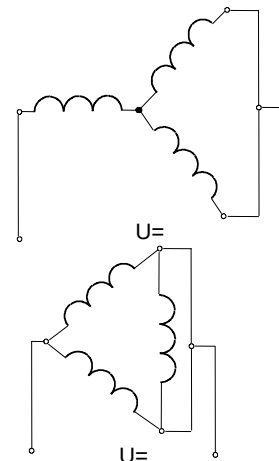
K1

Brzdění stejnosměrným proudem (dynamické brzdění)

Princip:

- a) motor odpojíme od střídavé sítě
- b) na satorové vinutí připojíme stejnosměrný zdroj
 - $\Rightarrow$ vytvoří se stejnosměrné magnetické pole
 - $\Rightarrow$ do pohybujícího se rotoru se indukuje napětí, prochází proud, který vytváří brzdňý moment

Brzdňý moment se s klesajícími otáčkami snižuje



Zapojení:

Existuje více možností sérioparalelního zapojení vinutí (trojfázové vinutí x stejnosměrný zdroj)

Velikost proudu:

Velikost proudu se volí tak, aby byl magnetický obvod plně využit (

Konstrukce 1f. motoru

Jednofázové motory se používají tam, kde není k dispozici trojfázová síť a zejména pro drobné spotřebiče v domácnostech

Konstrukce jednofázového motoru

Základní konstrukční provedení je stejné jako u trojfázového motoru s kotvou nakrátko a technologie výroby je stejná.

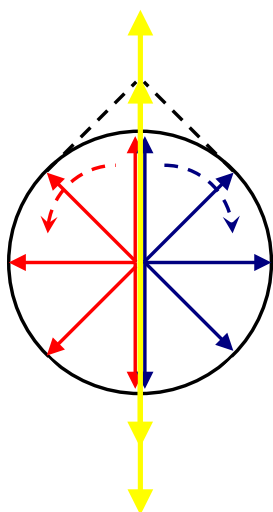
Na statoru je magnetický obvod z dynamových plechů, ve kterých jsou drážky. V drážkách jsou cívky statorového vinutí. Po založení vinutí se dvě fáze propojí do série a vinutí třetí fáze je rozběhové.

Konstrukční odlišnosti statoru jsou dány principem činnosti jednofázového motoru.

Rotor je nakrátko (hliníková klec odlita do drážek magnetického obvodu rotoru).

Činnost motoru

Jednofázová soustava vytvoří pulsující magnetické pole. Pro rozbor si znázorníme dvě točivá magnetická pole, která se otáčejí proti sobě synchronní rychlostí. Pulsující pole je dáno součtem obou polí.



1. Výchozí pozice – výsledný tok je max.
2. Natočení obou fázorů o 45° – výsledný tok je dán vektorovým součtem
3. Natočení obou fázorů o 90° – výsledný tok je nulový
4. Natočení obou fázorů o 135° – výsledný tok je dán vektorovým součtem
5. Natočení obou fázorů o 180° – výsledný tok je dán vektorovým součtem

Činnost motoru

Vlastnosti pulsujícího pole:

1. Pulsující pole nevytvoří točivý moment $\Rightarrow$ záběrový moment jednofázového motoru je nulový (motor se sám nerozeběhne)
2. Po mechanickém roztočení na přibližně $(20-40)\% n_s$ se motor rozběhne ($M > 0$) ve směru mechanického roztočení na jmenovité otáčky.
3. Kromě mechanického roztočení lze rozběh provést:
 - a) pomocným vinutím s fázově natočeným proudem
 - b) závitem nakrátko

Momentová charakteristika

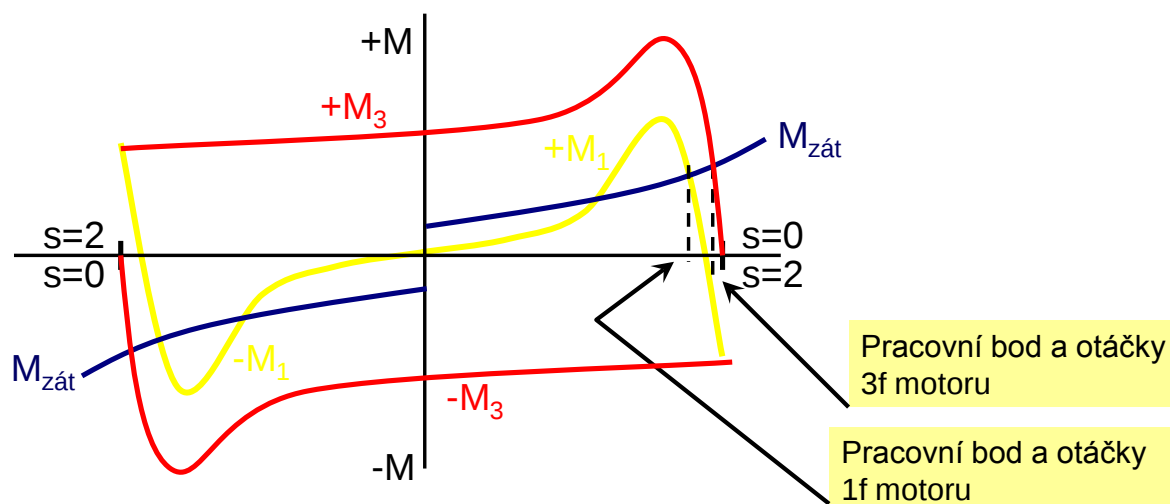
Pro stejný počet pólů
a stejnou zátěž platí:

$$n_{3f} > n_{1f}$$

Momentové charakteristiky točivého pole

Momentová charakteristika pulsujícího pole

Charakteristika zátěže



1f. motor s pomocným vinutím

Realizace pomocného vinutí:

1. Odporový rozběh

- a) vinutí je z materiálu s vyšším měrným odporem
- b) v obvodu pomocného vinutí je zapojen rezistor

Po dosažení určitých otáček se pomocné vinutí rozpojí

Motor má malý záběrový moment, použití pro malé výkony

2. Kapacitní rozběh

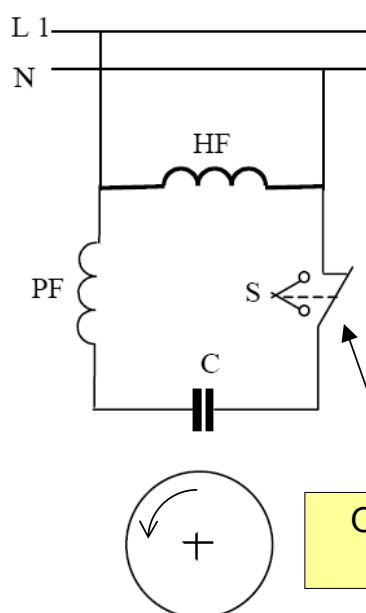
- a) trvale připojený kondenzátor – malý záběrový moment. Kondenzátor je zároveň kompenzační
- b) po dosažení určitých otáček se pomocné vinutí s C rozpojí – větší záběrový moment
- c) motor má 2 kondenzátory. Jeden se po rozběhu odpojí, druhý zůstává připojen

Motor má větší záběrový moment, tichý chod - použití je častější

K1

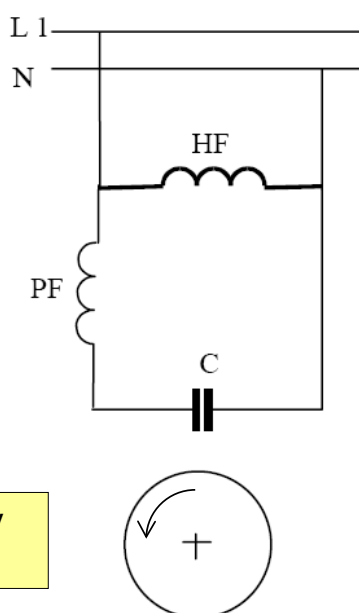
1f. motor s pomocným vinutím

Odpojení kondenzátoru,
případně odporu po
rozběhu

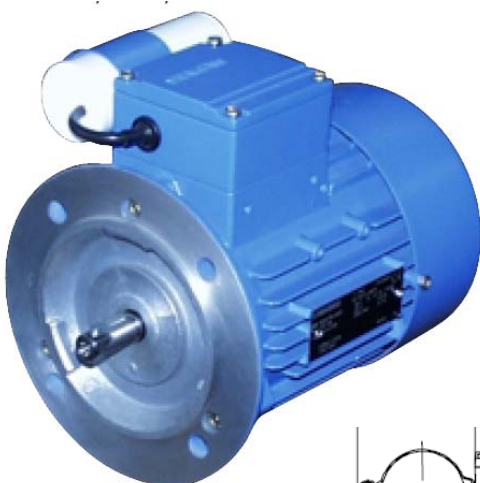
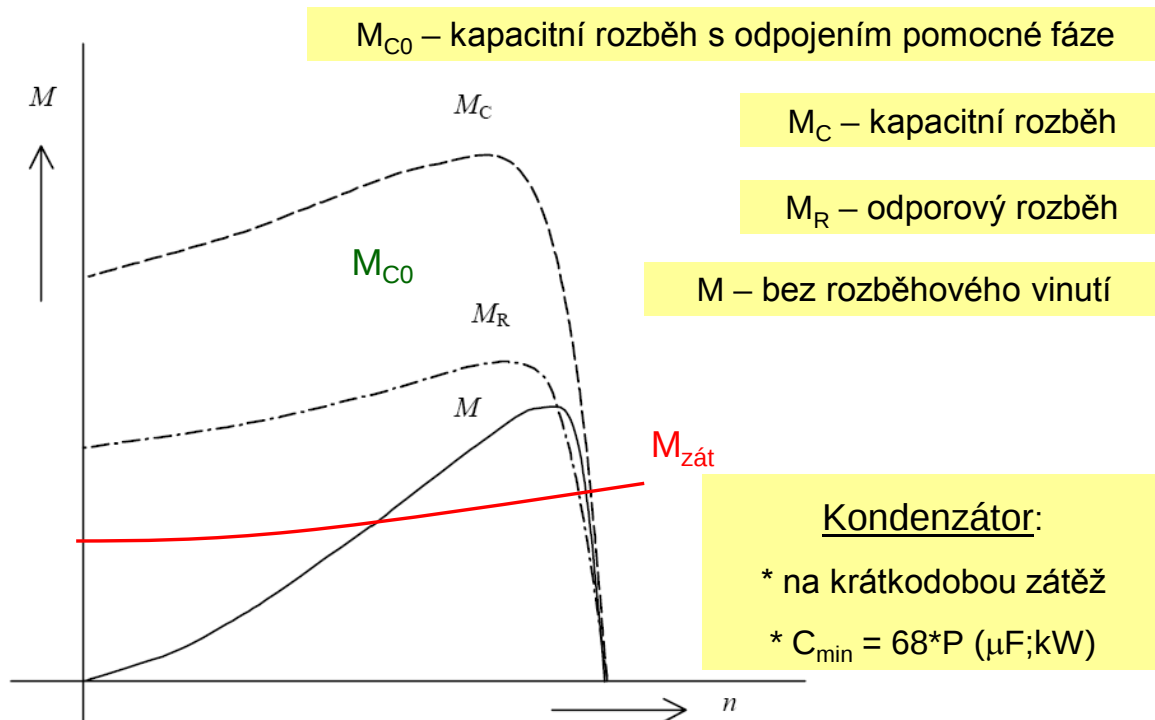


Odstředivý
vypínač

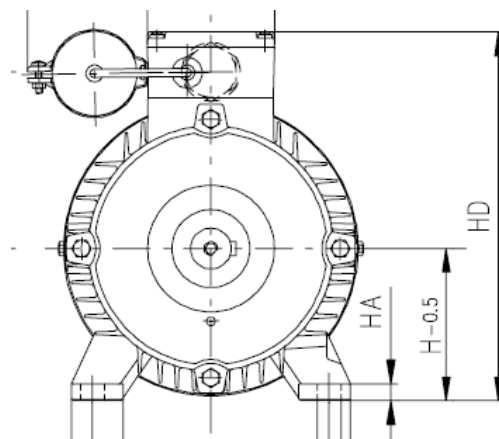
Trvale připojený kondenzátor ,
zlepšení účinníku a průběhu
momentu



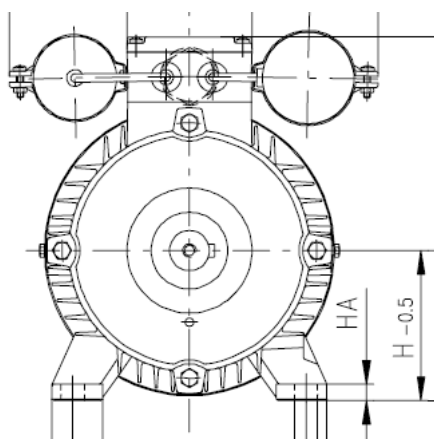
1f. motor s pomocným vinutím



2 kondenzátory
 trvale připojený
 a rozběhový



1 kondenzátor
 trvale připojený



Trvale připojený kondenzátor

Jednofázové motory s běhovým kondenzátorem

Jmen. výkon	Velikost	Objednáací číslo Označení pro napětí a tvar viz tabulka níže	Parametry při jmenovitém výkonu				Poměrný záběrný moment Mz/Mn při přímém spouštění	Poměrný záběrný proud Ik/In při přímém spouštění	Poměrný moment zvratu Mmax/Mn	C _B
			Otáčky min ⁻¹	Účinnost η %	Účinník cos φ	Jmenovitý proud při 230 V A				
0,09	56	1LF7050-2AB..	2870	63	0,98	0,63	0,83	4,2	2,1	3
0,12	56	1LF7053-2AB..	2820	62	0,98	0,86	0,76	3,3	1,6	4
0,18	63	1LF7060-2AB..	2895	62	0,94	1,34	0,51	2,5	4,3	5
0,25	63	1LF7063-2AB..	2850	68	0,99	1,6	0,49	1,9	4,3	8
0,37	71	1LF7070-2AB..	2895	65	0,87	2,85	0,5	2,7	4,2	12
0,55	71	1LF7073-2AB..	2860	65	0,89	4,15	0,42	2,1	4,0	16
0,75	80	1LF7080-2AB..	2905	74	0,97	4,5	0,32	2,36	5,6	16
1,1	80	1LF7083-2AB..	2910	78	0,98	6,25	0,35	2,53	6,1	25
1,5	90	1LF7090-2AB..	2900	74	0,97	9,1	0,42	3,13	6,2	40
2,2	90	1LF7096-2AB..	2810	72	0,98	13,6	0,37	1,75	4,5	50
3,0	100	1LF7106-2AB..	2840	77	0,97	17,5	0,41	2,5	5,1	60

2 kondenzátory – rozběhový a trvale připojený

Jmen. výkon	Velikost	Objednáací číslo Označení pro napětí a tvar viz tabulka níže	Parametry při jmenovitém výkonu				Poměrný záběrný moment Mz/Mn při přímém spouštění	Poměrný záběrný proud Ik/In při přímém spouštění	Poměrný moment zvratu Mmax/Mn	C _B	C _R
			Otáčky min ⁻¹	Účinnost η %	Účinník cos φ	Jmenovitý proud při 230 V A					
0,18	63	1LF7060-2AE..	2895	62	0,94	1,34	1,90	5,20	2,5	5	25
0,25	63	1LF7063-2AE..	2850	68	0,99	1,6	1,80	4,60	1,9	8	25
0,37	71	1LF7070-2AE..	2895	65	0,87	2,85	1,70	3,50	2,7	10	40
0,55	71	1LF7073-2AE..	2860	65	0,89	4,15	1,70	3,70	2,1	12	40
0,75	80	1LF7080-2AE..	2845	71	0,98	4,7	1,71	4,10	1,6	18	60
1,1	80	1LF7083-2AE..	2860	73	0,98	6,7	1,70	4,40	1,75	25	80
1,5	90	1LF7090-2AE..	2845	72	0,98	9,25	2,00	4,50	2,04	35	120
2,2	90	1LF7096-2AE..	2830	74	0,97	13,3	1,85	4,80	2,15	40	160
3,0	100	1LF7106-2AE..	2840	77	0,97	17,5	2,10	5,30	2,5	60	180

Připojení 3f motoru na jednofázovou síť

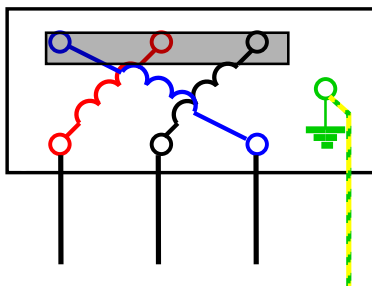
Použití: vhodné v případech, kde není trojfázová síť a je k dispozici trojfázový motor

Zapojení:

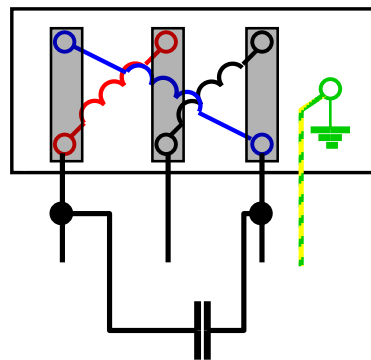
- * na štítku motoru je jmenovité napětí 400/230 V (380/220 V)
- * v trojfázovém zapojení je v soustavě 400 V motor zapojen do hvězdy, napětí na jedné fázi je 230 V
- * v jednofázové soustavě se trojfázové vinutí motoru zapojí do trojúhelníku $\Rightarrow$ napětí na jednu fázi zůstává 230 V
- * pro rozběh se musí použít rozběhový kondenzátor
- * výkon motoru je zhruba $P_{1f} \cong 70 \% P_{3f}$

K1

Připojení 3f motoru na jednofázovou síť



3fázová síť



1fázová síť

Činnost motoru:

- * $C_{\min} = 68 \cdot P$ (μF , kW)
- * velikost C je dána požadovaným záběrovým momentem
- * podle připojeného C zůstane pomocná fáze připojena, nebo se odpojí

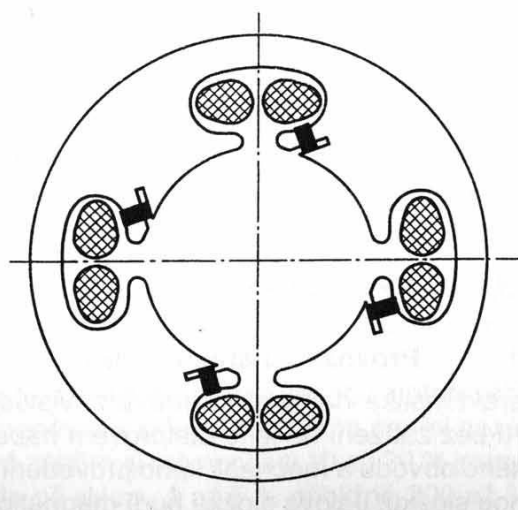
Jednofázový motor se stíněným pólem

Význam: konstrukce motoru odstraňuje hlavní nevýhodu jednofázového motoru s rozběhovým vinutím – požadavek pomocného vinutí

Konstrukce: pomocné vinutí je nahrazeno závitem nakrátko, který je umístěn na hlavním pólu
pro jednodušší výrobu jsou cívky umístěny na pólech
Vhodné jen pro velmi malé výkony

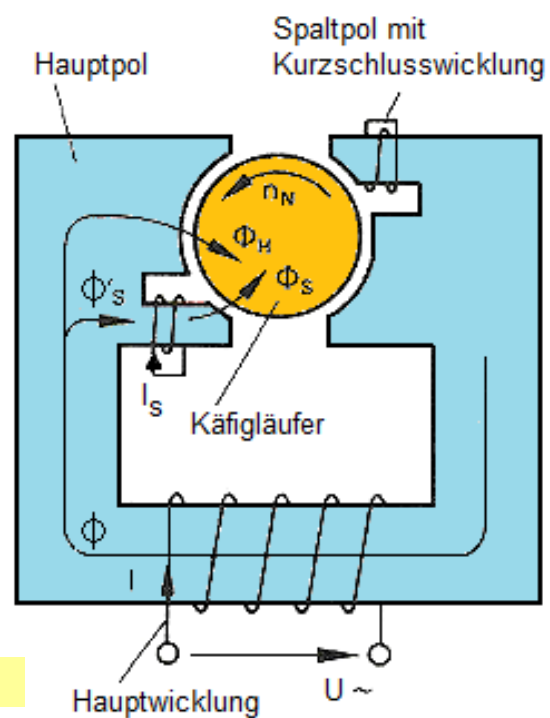
K1

Jednofázový motor se stíněným pólem

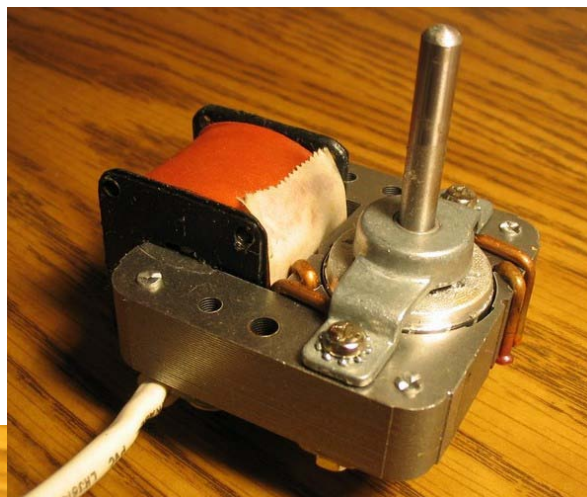


čtyřpólový motor

dvoupólový motor



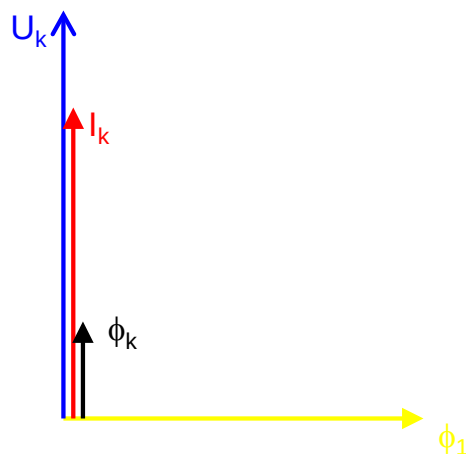
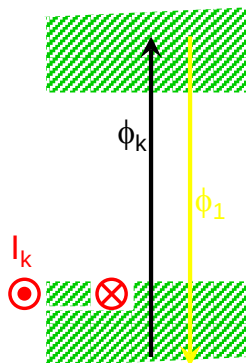
Jednofázový motor se stíněným pólem



dvoupólový motor

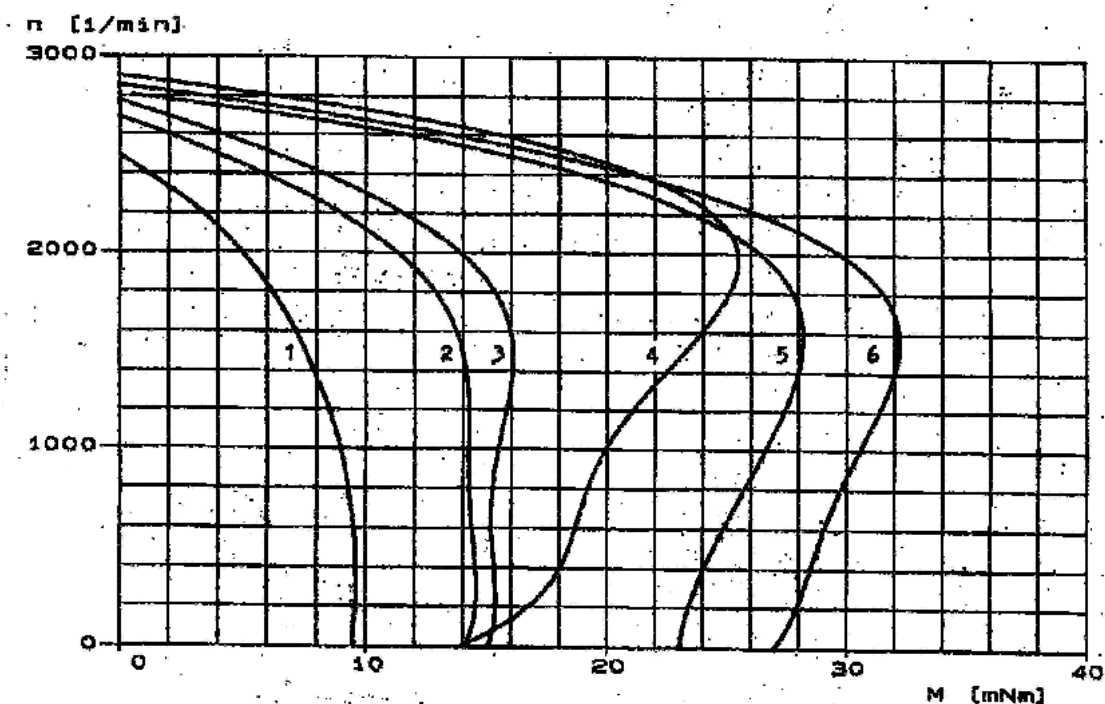
Význam závitu nakrátko

1. Magnetickým obvodem prochází indukční tok - ϕ_1
2. V závitu nakrátko se indukuje napětí, proteče indukovaný proud - I_k
3. Vytvoří se magnetické pole závitu nakrátko, které působí proti hlavnímu toku (Lenzův zákon) - ϕ_k
4. Vektorovým součtem obou polí dostaneme točivé eliptické magnetické pole



Charakteristiky motoru

výkony 14 (1) – 38 W (6)



Vlastnosti a použití

Výhody:

- * jednoduchá konstrukce
- * cenově výhodný
- * tichý chod
- * bez nutnosti údržby
- * samostatný rozběh

Nevýhody:

- * malá účinnost
- * malý záběrový moment
- * jen pro malé výkony
- * nelze reverzovat

Použití:

- pohony s malými výkony a nízkými požadavky na M_z
- * ventilátory (samostatně i chlazení elektrických přístrojů)
 - * čerpadla – pračky
 - * pohony pro klimatizace a chladicí zařízení

JEDNOFÁZOVÉ / SINGLE PHASE / SÉRIE MONOPHASÉE / EINPHASIG

Typ	ot. / min. max.	I max. (A) 230 400		kW	m³/h	dB (A)	kg
HJEPA 20 M4	1.300	0,2	-	0,03	500	37	1,5
HJEPA 25 M4	1.300	0,35	-	0,056	900	42	2,5
HJEPA 30 M4	1.300	0,55	-	0,077	1.350	47	3,5
HJEPA 35 M4	1.300	0,7	-	0,075	1.825	50	4

Příklady

Příklad - 1

3 fázový asynchronní motor s kotvou nakrátko má tyto jmenovité údaje zjištěné z výkonového štítku motoru a z katalogu výrobce:

Jmenovitý výkon $P_{2N} = 1,8 \text{ kW}$, jmenovité napájecí napětí $U_{1N} = 400/230 \text{ V}$, jmenovité otáčky $n = 1380 \text{ min}^{-1}$, $\cos\varphi_N = 0,832$, kmitočet napájecího napětí $f_1 = 50\text{Hz}$, statorové vinutí je zapojeno do Y, $\eta = 0,764$.

nakreslete schéma zapojení, je-li statorové vinutí zapojeno do Y, označte všechny pro výpočet důležité veličiny

Určete:

1. velikost jmenovitého příkonu odebíraného z elektrické sítě,
2. velikost jmenovitých výkonových ztrát,
3. velikost jmenovitého statorového proudu
4. jmenovitý točivý moment.

Příklad - 2

O 3 fázovém asynchronním klecovém motoru se statorovým vinutím zapojeným do Y je známo, že má tyto jmenovité údaje:

Jmenovité otáčky $n = 1350 \text{ min}^{-1}$, jmenovitý moment $M_N = 1,274 \text{ Nm}$, $U_{1N} = 400/230 \text{ V}$ (Y/D), $I_{1N} = 0,57/0,99 \text{ A}$ (Y/D), $\cos \varphi_N = 0,77$.

Určete:

1. jmenovitý výkon motoru
2. jmenovitý příkon motoru
3. velikost jmenovitých výkonových ztrát
4. jmenovitý skluz
5. jmenovitou účinnost a jmenovitou účinnost v procentech.

Příklad - 3

3 fázový asynchronní motor s kotvou nakrátko má tyto jmenovité údaje:

Jmenovitý výkon $P_{2N} = 1,5 \text{ kW}$, jmenovité napájecí napětí $U_{1N} = 400/230 \text{ V}$, jmenovitý napájecí

proud $I_{1N} = 3,5/6,1 \text{ A (Y/D)}$, jmenovité otáčky $n = 1425 \text{ min}^{-1}$, počet pólů $2p = 4$

jmenovitá účinnost $\eta_N (\%) = 78\%$, kmitočet napájecího napětí $f_1 = 50 \text{ Hz}$.

Určete:

1. příkon motoru,
2. jeho účinník
3. jmenovitý točivý moment motoru
4. synchronní otáčky motoru.

Příklad - 4

Trojfázový asynchronní klecový motor má podle katalogového listu tyto údaje:

Jmenovitý výkon na hřídeli $P_{2N} = 100 \text{ kW}$, jmenovité napájecí napětí $U_{1N} = 3 \times 400 \text{ V}$, vinutí statoru spojené do trojúhelníku, frekvence napájecího napětí $f_1 = 50 \text{ Hz}$, jmenovitý účinník $\cos\varphi_N = 0,87$, jmenovité otáčky motoru $n = 1480 \text{ min}^{-1}$, počet pólů motoru 4,

jmenovitá účinnost $\eta_N = 0,935$, poměrný záběrný proud $p_I = I_Z / I_N = 7,5$, poměrný záběrný moment $p_Z = M_Z / M_N = 2,4$, momentová přetížitelnost $p_m = M_m / M_N = 2,6$.

nakreslete schéma zapojení, je-li statorové vinutí zapojeno do D,

Určete:

1. synchronní otáčky motoru,
2. potřebný jmenovitý příkon motoru (při jmenovitém zatížení)
3. jmenovitý proud statoru (tj. proud v přívodních fázových vodičích vedení),
4. záběrný proud statoru (při $n = 0$, tj. $s = 1$),
5. jmenovitý mechanický moment na hřídeli motoru,
6. záběrný moment,
7. maximální moment (tzv. moment zvratu),
8. jmenovitý skluz a jmenovitý skluz v procentech,
9. jmenovitý kmitočet v rotoru motoru.

Příklad - 5

Trojfázový klecový AM má při jmenovitých otáčkách $n = 1465 \text{ min}^{-1}$ moment $M_n = 48,9 \text{ N} \cdot \text{m}$, momentovou přetížitelnost $p_m = 3,2$.

nakreslete náčrt mechanické charakteristiky a vyznačte situaci popsanou v zadání,

Určete:

1. jmenovitý výkon motoru,
2. moment zvratu,
3. moment motoru $M_{(1,1)}$ při otáčkách rotoru $n_{(1,1)} = 1456 \text{ min}^{-1}$,
4. otáčky rotoru $n_{(0,75)}$ při $M_{(0,75)} = 36,7 \text{ N} \cdot \text{m}$,

Příklad - 6

Trojfázový klecový AM má jmenovitý příkon motoru $P_{1N} = 40 \text{ kW}$, jmenovité otáčky motoru $n = 965 \text{ min}^{-1}$, počet pólů motoru $2p = 6$, jmenovitý kmitočet napájecího napětí $f_1 = 50 \text{ Hz}$, jmenovité ztráty ve vinutí statoru $\Delta P_{j1N} = 1,1 \text{ kW}$, jmenovité ztráty v železe statoru $\Delta P_{Fe1N} = 0,6 \text{ kW}$, jmenovité ztráty mechanické (tzn. ventilační, třením o vzduch ve vzduchové mezeře, apod.) $\Delta P_{mN} = 0,66 \text{ kW}$. Ztráty v magnetickém obvodu rotoru pro tento případ zanedbejte.

Určete účinnost

Příklad - 7

O trojfázovém klecovém asynchronním motoru máme tyto informace: Jedná se o 6-ti pólový nízkonapěťový motor typu 1LA7 se statorovým vinutím zapojeným do Y, $U_{1N} = 400/230 \text{ V}$, $f_1 = 50 \text{ Hz}$, $P_{2N} = 11 \text{ kW}$, $\eta_N = 0,875$, $\cos\varphi_N = 0,832$, $\Delta P_{FE1N} = 210 \text{ W}$, ztráty mechanické, dodatečné a v železe rotoru zanedbejte.

nakreslete schéma zapojení

Dále výpočtem určete jmenovité hodnoty:

1. otáček rotoru,
2. momentu
3. proud přívodními vodiči, předpokládáme-li, že jmenovité ztráty ve vinutích statoru a rotoru jsou přibližně stejné.

Příklad - 8

U trojfázového klecového asynchronního motoru z příkladu 4

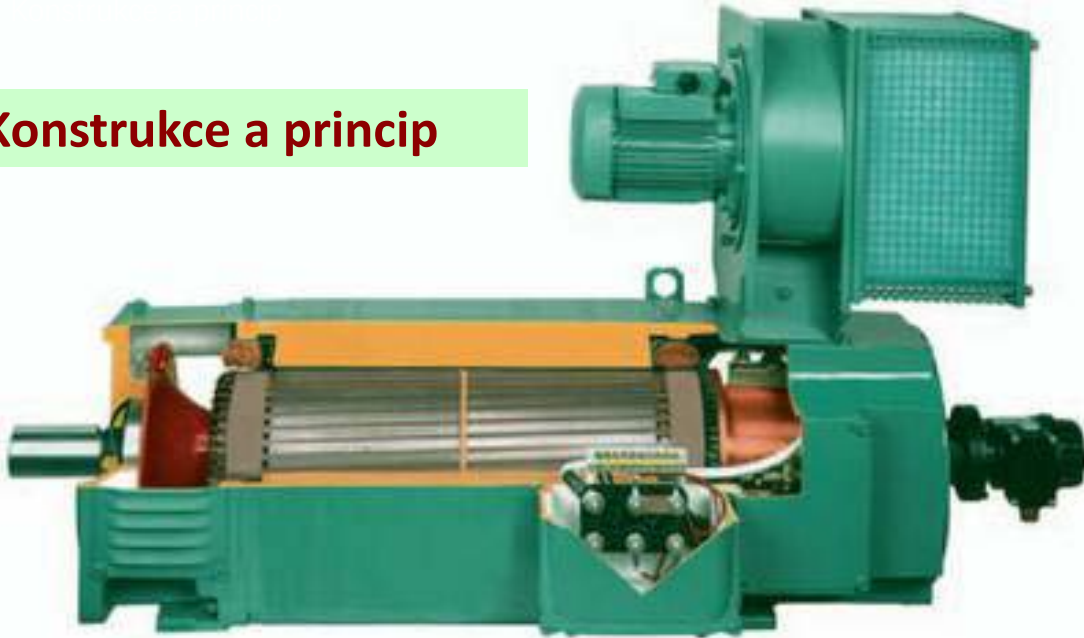
Jmenovitý výkon na hřídeli $P_{2N} = 100 \text{ kW}$, jmenovité napájecí napětí $U_{1N} = 3 \times 400 \text{ V}$, vinutí statoru spojené do trojúhelníku, frekvence napájecího napětí $f_1 = 50 \text{ Hz}$, jmenovitý účinník $\cos\varphi_N = 0,87$, jmenovité otáčky motoru $n = 1480 \text{ min}^{-1}$, počet pólů motoru 4, jmenovitá účinnost $\eta_N = 0,935$

Výpočtem určete

1. kolik elektrické energie se spotřebuje, bude-li tento motor pracovat při jmenovitém zatížení po dobu 8,5 hodiny denně nepřerušovaně po celý měsíc březen a duben,
2. kolik elektrické energie se při stejných podmínkách a tutéž dobu neefektivně ztratí,
3. kolik zaplatíme při provozu tohoto motoru, je-li sazba $X1 = 3,75 \text{ Kč/kWh}$,
4. jaké jsou v tomto případě náklady na jen efektivně vynaloženou elektrickou energii.

Stejnoseměrné stroje

Konstrukce a princip



Základní informace

Stejnoseměrné stroje patří mezi nejstarší točivé stroje.

V počátku se používaly pro výrobu elektrické energie (stejnoseměrné generátory – dynama), v dalším období našly využití zejména jako motory.

S rozvojem střídavých pohonů s polovodičovým řízením se význam stejnosměrných strojů postupně snižuje (zejména u motorů je útlum ale pomalejší, než se všeobecně očekávalo).

Kde bychom dnes mohli najít stejnosměrné stroje ?

- * diesel-elektrická trakce (generátory i motory)
- * elektrická trakce (motory)
- * pohony malých výkonů (motory)
- * starší provozy a výrobní linky (motory)

Rozdělení stejnosměrných strojů

Podle toku energie:

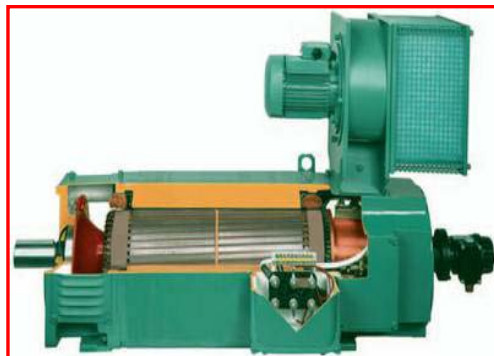
- * **stejnosměrné generátory (dynama)**
- * **stejnosměrné motory**

Podle buzení:

- * **stejnosměrné stroje s cizím buzením**
- * **stejnosměrné stroje s vlastním buzením**
 - sériové (zejména motory)
 - derivační (motory a dynama)
 - kompaundní
 - protikompaundní (svářecí agregáty)

Podle konstrukce:

- * **komutátorové**
- * **bezkomutátorové**



K1

Konstrukce stejnosměrných strojů

Konstrukce motorů a generátoru je stejná.

Základní části

- * **stator**
- * **rotor**
- * **sběrací mechanismus nebo systém pro snímání otáček**
- * **ventilátor (závislý nebo nezávislý s vlastním pohonem)**

Stator klasického stejnosměrného stroje:

- * **pevná část stroje, která je součástí magnetického obvodu**
- * **litý nebo svařovaný magnetový věnec**
- * **na statoru jsou budící póly a pomocné póly s pólovými nastavci a s budícím a pomocným vinutím (pomocné vinutí zlepšuje chod stroje a pro princip není podmínkou)**

Budící vinutí může být nahrazeno trvalým magnetem.

Konstrukce stejnosměrných strojů

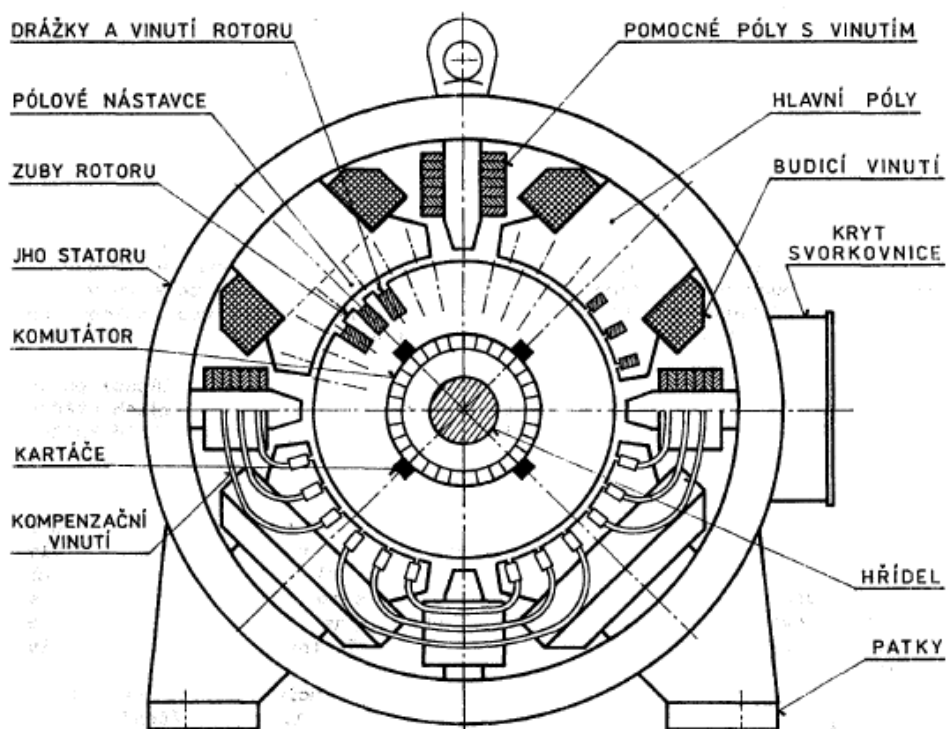
Rotor (kotva) klasického stejnosměrného stroje:

- * rotor je složen ze vzájemně izolovaných plechů s drážkami
- * v drážkách je uloženo stejnosměrné vinutí, začátky a konce vinutí jsou vyvedeny na lamely komutátoru
- * komutátor je tvořen soustavou vzájemně izolovaných lamel (tvrdá měď)
- * komutátor může být lisovaný (menší výkony) nebo skládaný (větší výkony)

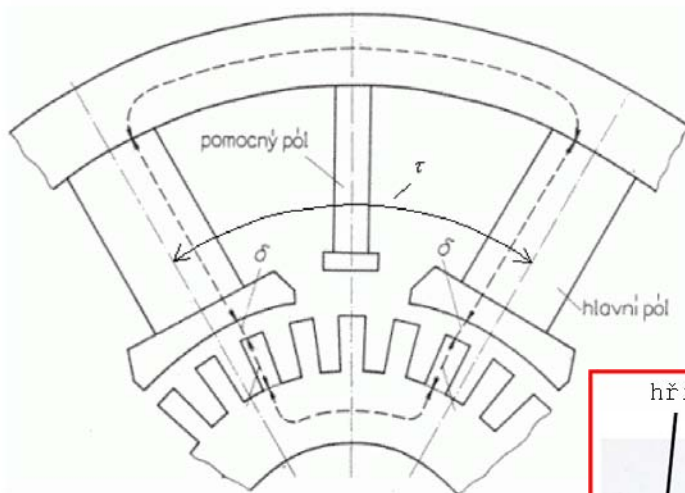
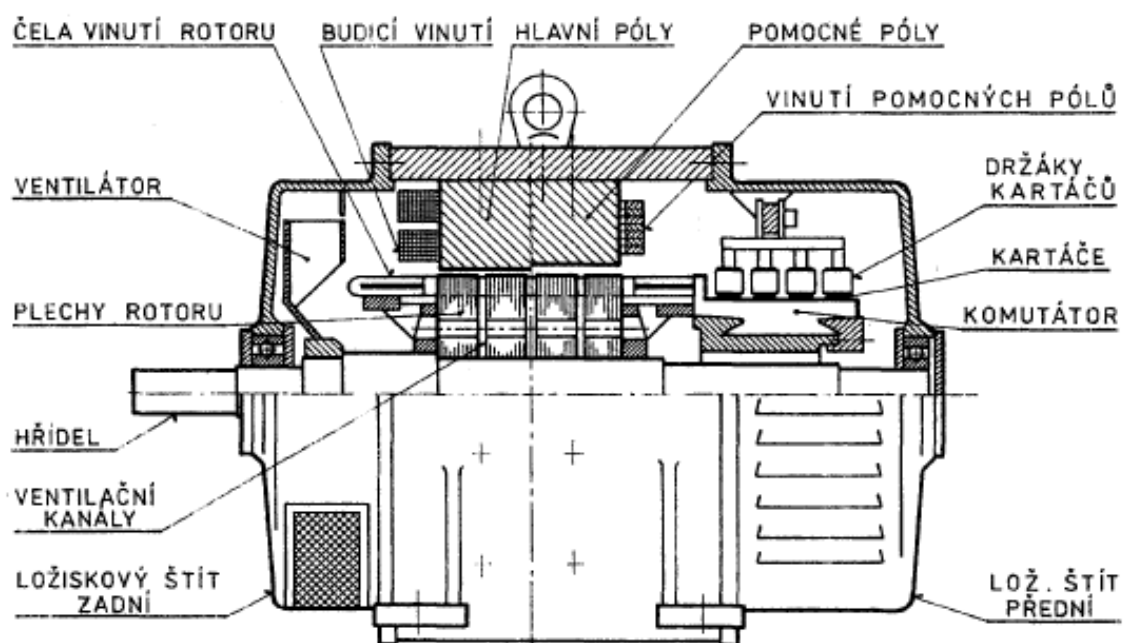
Sběrací ústrojí klasického stejnosměrného stroje:

- * klusný kontakt mezi pevnou a pohyblivou částí tvoří lamela komutátoru a uhlíkový kartáč
- * kartáč je v pouzdře, které je upevněno v držáku kartáčů
- * držáky kartáčů jsou připevněny izolovaně na nosný kruh (brejle), kterým lze otáčet a umožnit nastavení kartáčů do optimální pozice.

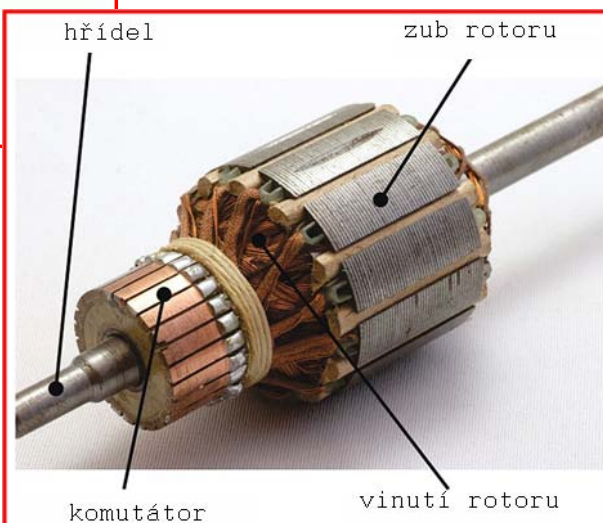
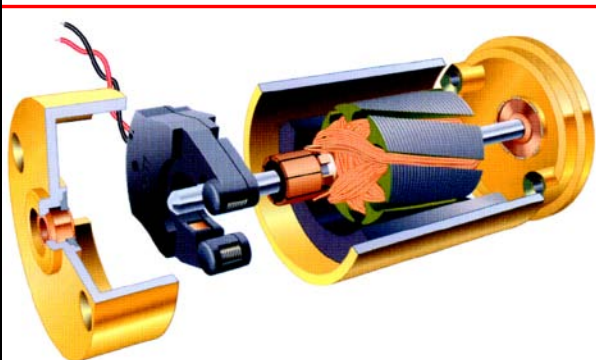
Konstrukce



Konstrukce



Magnetický obvod



K1

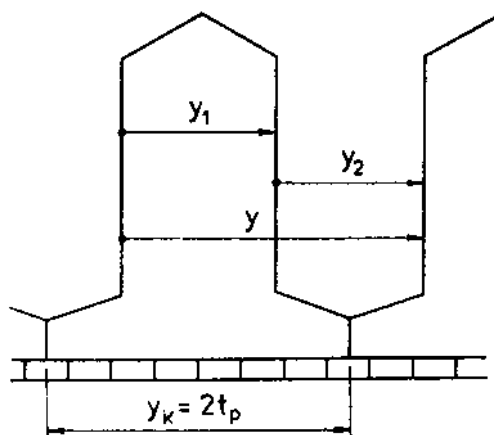
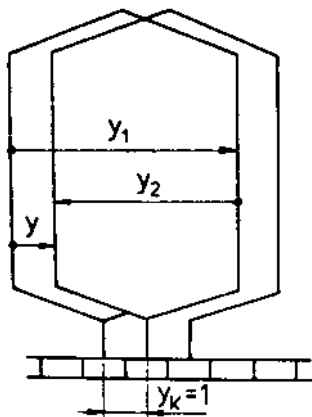
Vinutí stejnosměrného stroje

Podle připojení cívek ke komutátoru rozlišujeme stejnosměrná vinutí

Smyčková – začátek a konec cívky vyveden na sousední lamely

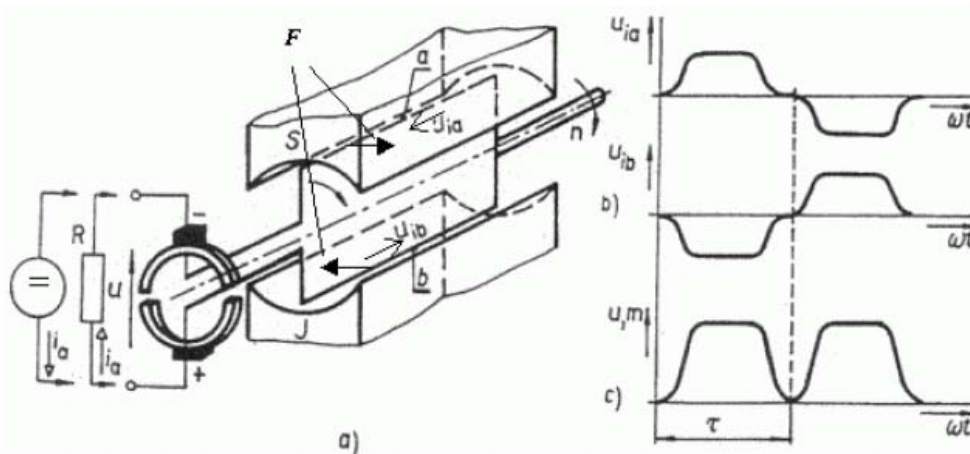
Vlnová – konce vyvedeny na lamely vzdálené dvě pólové rozteče.

Má vždy jen dvě paralelní větve a o to více závitů v sérii – indukuje se vyšší napětí



K1

Princip činnosti (dynamo)



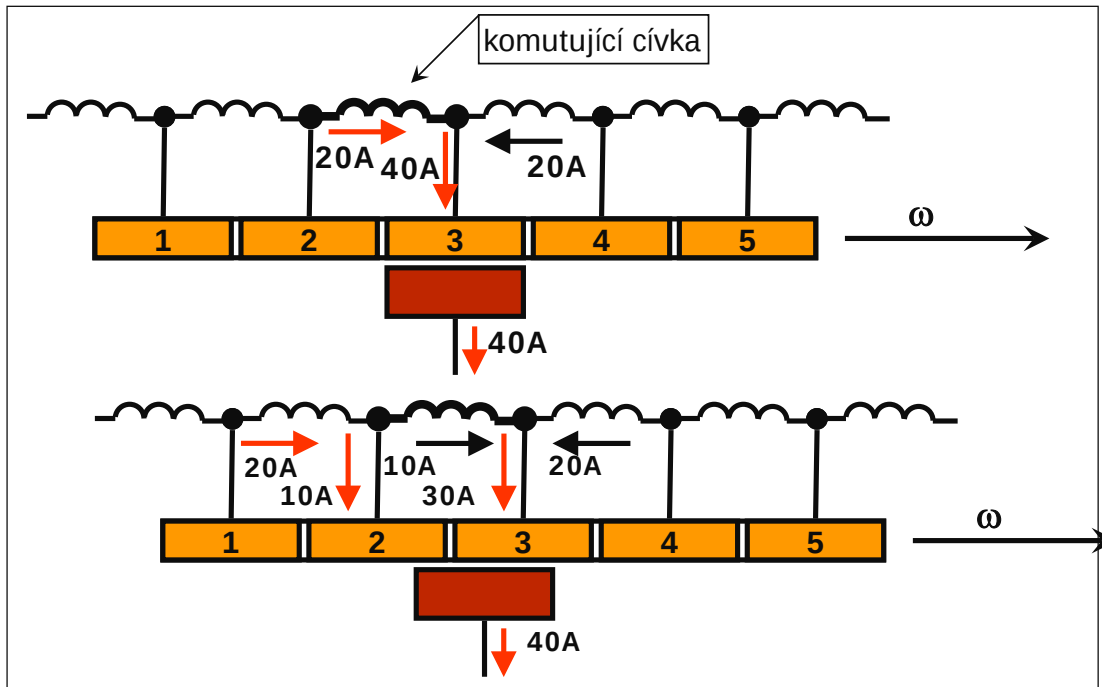
cívka rotoru se otáčí a v budícím magnetickém poli statoru

- * podle indukčního zákona se na cívce indukuje střídavé napětí ($U_i = B \cdot l \cdot v$)
- * komutátor pracuje jako mechanický usměrňovač $\Rightarrow$ střídavé napětí se přemění na stejnosměrné, pulsující
- * po připojení zátěže prochází proud, směr proudu je dán pravidlem pravé ruky

Komutace

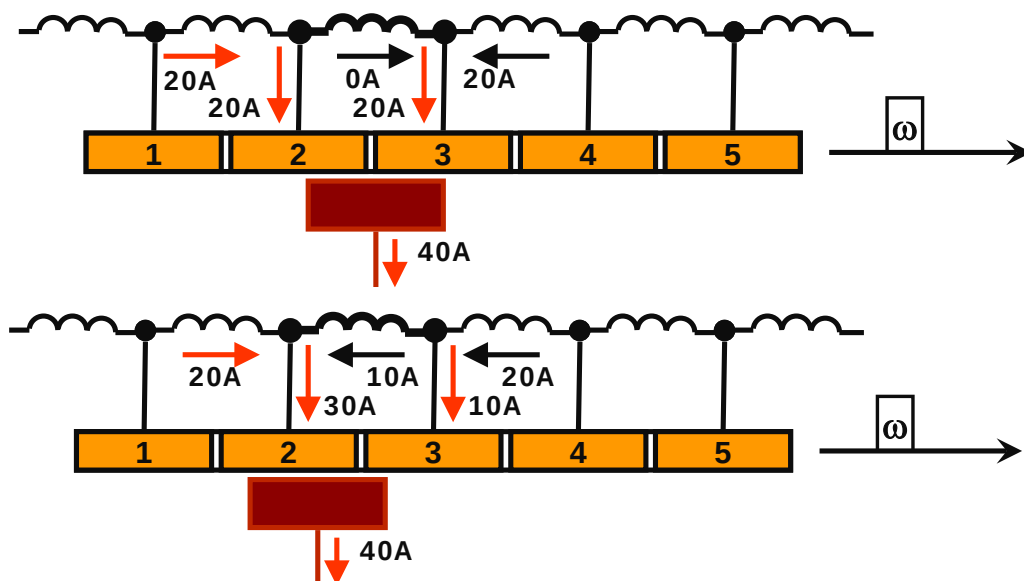
Komutace je změna smyslu proudu v cívce.

Předpoklad – rozložení proudu odpovídá poměru odporů kartáče.



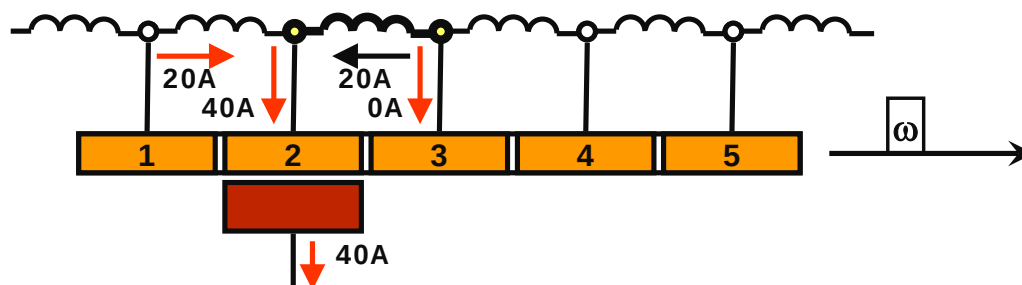
Komutace

Proud v komutující cívce poklesne v závislosti na pozici kartáče.



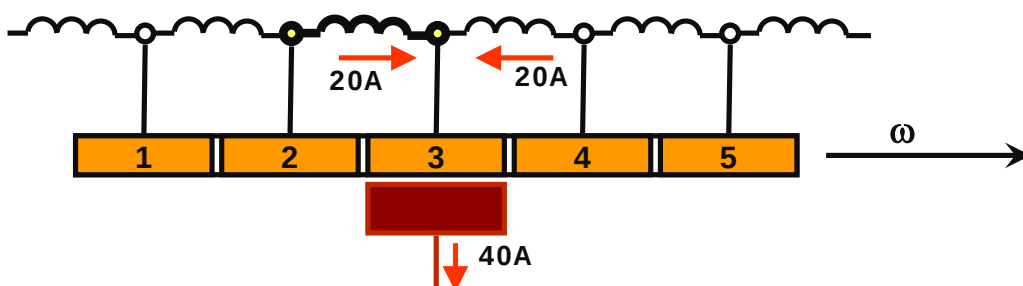
Komutace

Komutace je ukončena $\Rightarrow$ Proud v komutující cívce je záporný.

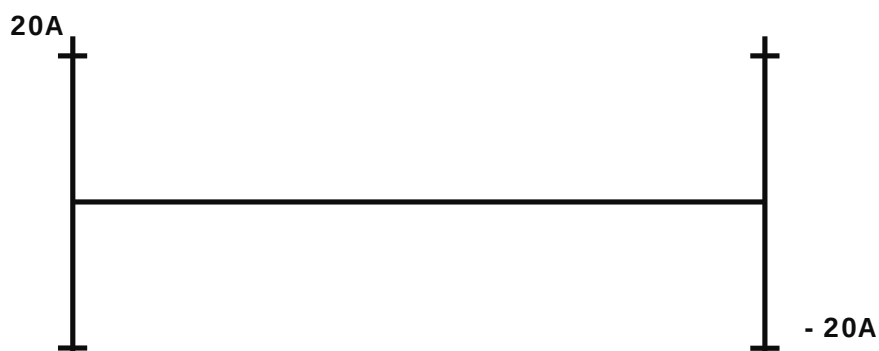


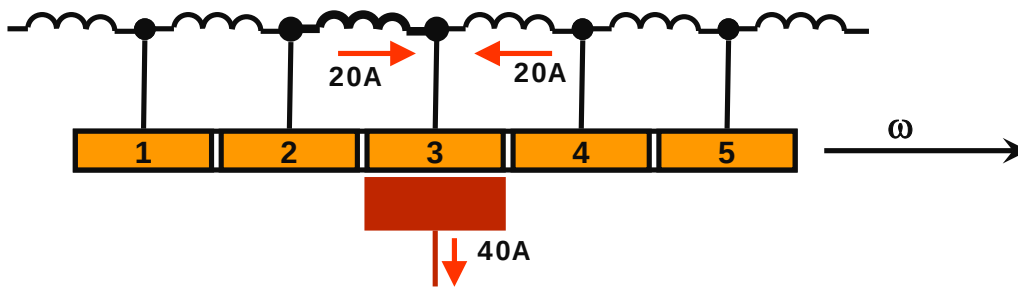
- * v ideálním případě je změna proudu v komutující cívce lineární (přímková komutace)
- * v komutující cívce se indukuje reaktanční napětí:
- * v okamžiku, kdy lamela opouští kartáč se může vytvořit mezi lamelou a kartáčem výboj

Komutace



Ideální průběh proudu a reaktančního napětí v komutující cívce

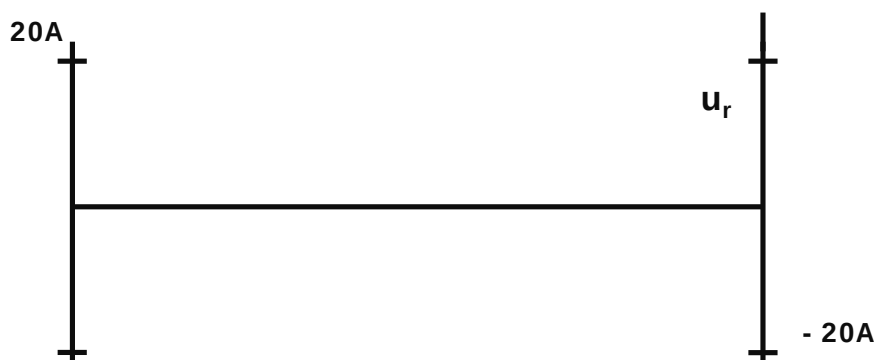




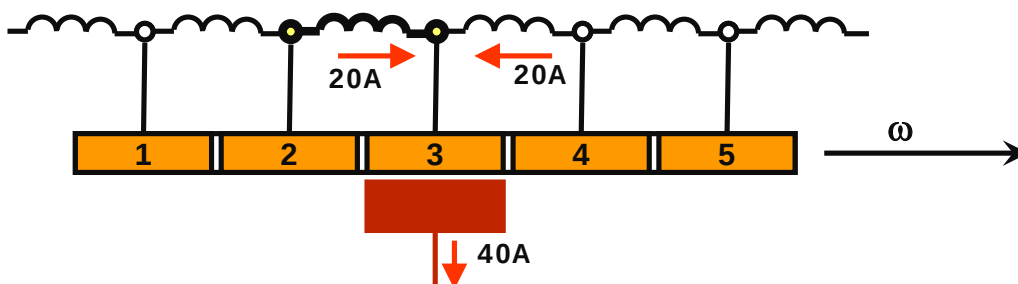
Zpožděný průběh proudu a reaktanční napětí v komutující cívice
 nejméně příznivý případ – maximální reaktanční napětí při ukončení komutace

Čím je dán zpožděný průběh proudu ?

Na cívice se indukuje napětí, které se snaží udržet proud v původním směru



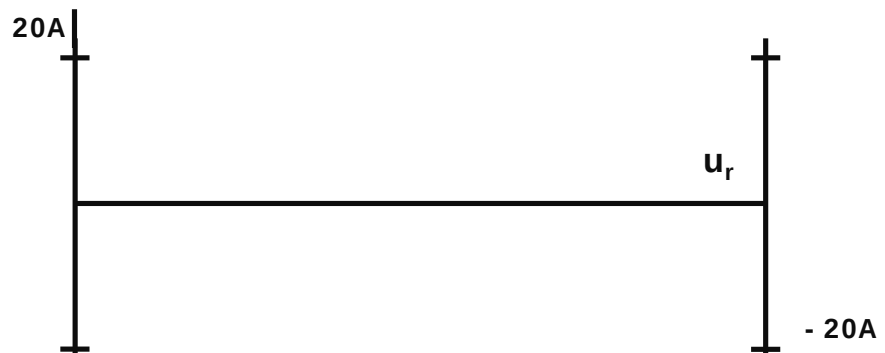
K1



Zrychlená komutace a reaktanční napětí v komutující cívice
optimální případ – nulové reaktanční napětí při ukončení komutace

Jak lze dosáhnout zrychlené komutace ?

Na cívice se vytvoří komutační napětí, které působí proti reaktančnímu napětí

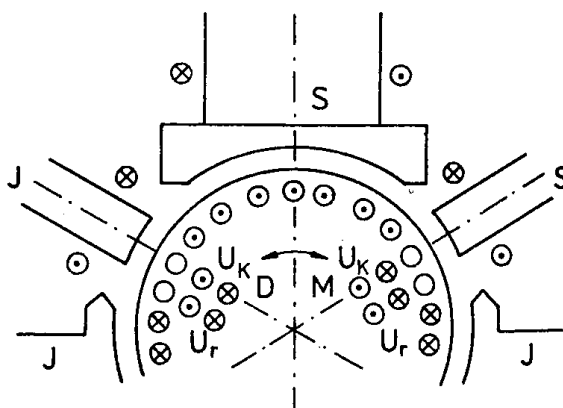


Komutace

Jak lze vytvořit komutační napětí.

1. natočením kartáčů z neutrální osy (u dynama ve směru točení, u motoru proti směru točení)
Nejjednodušší případ, který je ale vhodný pouze pro konstantní zátěž stroje – jen u malých strojů
2. vytvořením pomocného mag. pole (komutační vinutí – komutační (pomocné póly))

Komutační vinutí vytvoří v komutující cívce komutační indukované napětí, které působí proti reaktančnímu napětí. Velikost reaktančního napětí je dána proudem v kotvě, komutační vinutí je zapojeno sériově s vinutím kotvy, ale s opačným směrem proudu

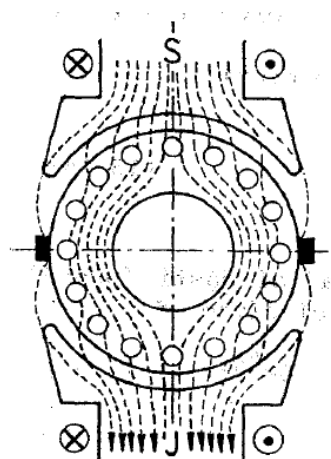


Reakce kotvy

Reakce kotvy vzniká při zatížení stejnosměrného stroje.

neutrální osa - je osa, která je kolmá na indukční čáry. Je-li cívka v neutrální ose, neindukuje se ní žádné napětí
osa kartáčů - je dána mechanickým natočením kartáčů

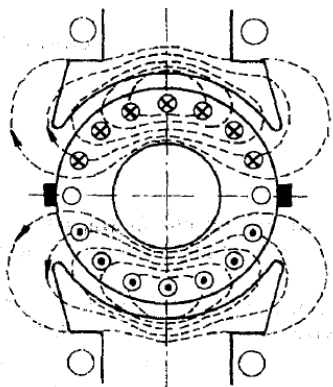
V ideálním případě leží osa kartáčů v neutrální ose.



1. Stav naprázdno

Kotvou prochází pouze budící tok budícího vinutí. Osa kartáčů, osa stroje a osa kartáčů jsou totožné.

Na komutující cívce není žádné indukované napětí $\Rightarrow$ ideální případ.



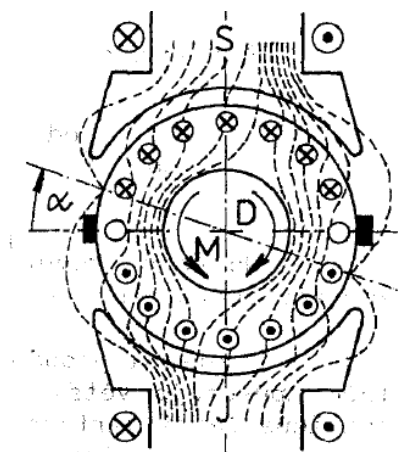
Reakce kotvy

2. Magnetické pole vinutí kotvy

Při průchodu proudu vinutím kotvy se vytvoří magnetické pole kotvy (pravidlo pravé ruky). Tok budícího vinutí neuvažujeme

3. Výsledné magnetické pole

je dáno složením obou polí. V důsledku magnetického pole kotvy dojde k deformaci výsledného magnetického toku a k natočení neutrální osy (u dynama ve směru a u motoru proti směru točení). Osa kartáčů neodpovídá neutrální ose $\Rightarrow$ jiskření mezi kartáčem a lamelou.

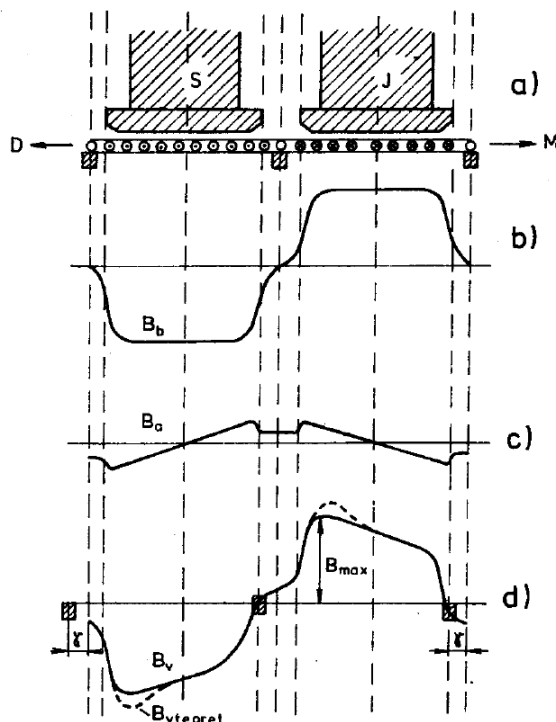


K1

Důsledek reakce kotvy

1. Natočení neutrální osy z osy kartáčů má za následek jiskření mezi lamelou a kartáčem
2. Magnetická indukce pod pólem není konstantní a deformuje se. Pod jednou částí pólu se zvyšuje, pod druhou částí se snižuje. Důsledkem je přesycení části pólu magnetického obvodu a pokles výsledného budícího toku $\Rightarrow$?
 - * pokles napětí (dynama)
 - * pokles momentu (motory).
3. Deformace magnetického toku vede ke zvýšení ztrát v železe v magnetickém obvodu kotvy.

Důsledek reakce kotvy



- a) rozvinuté póly budícího vinutí
- b) průběh magnetické indukce budícího vinutí
- c) průběh magnetické indukce vinutí kotvy (reakčního pole)
- d) výsledný průběh magnetické indukce. Vlivem přesycení se snižuje výsledný tok (plocha pod křivkou indukce).

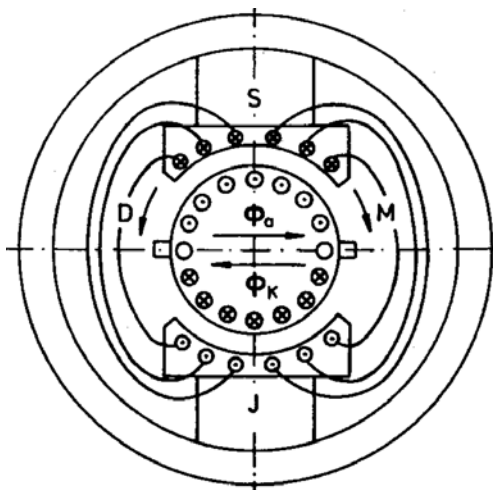
$$B_{\text{skut}} \neq B_{\text{teor}}$$

Kompenzace reakce kotvy

Úplná kompenzace

Kompenzační vinutí – vinutí, které vytváří stejně velký, ale opačný magnetický tok. Kompenzační vinutí je zapojeno do série s vinutím kotvy.

Kompenzační vinutí se používá je u strojů s velkým výkonem.



Kompenzace reakce kotvy

Částečná kompenzace

1. Zvýšení buzení hlavních pólů
2. Využití komutačního vinutí – urychlení komutace
3. Natočením kartáčů – urychlení komutace

Správné natočení kartáčů patří mezi nejdůležitější úkoly při montáži. Provádí se přesným měřením.

Jestliže se provádí demontáž stroje je bezpodmínečně nutné označení stávající pozice kartáčů – nosného kruhu (nosný kruh umožňuje natočení).

Stejnoseměrné generátory - dynamo

Dynamo jsou nejstarší elektrické stroje na výrobu elektrické energie, jejich význam v současné době je ale minimální.

Jestliže je dnes požadavek stejnosměrné energie, používá se střídavý zdroj s usměrňovačem.

Provozní charakteristiky

- * charakteristika naprázdno
- * zatěžovací charakteristika
- * regulační charakteristika

Indukované napětí

Velikost indukovaného napětí na kotvě lze odvodit na základě indukovaného pohybovaného napětí:

$$U_i = B * l * v \quad (V; T, m, m \cdot s^{-1})$$

kde $B \approx \phi$

$l \approx$ na konstrukci stroje, počtu závitů, ...

$v \approx n$

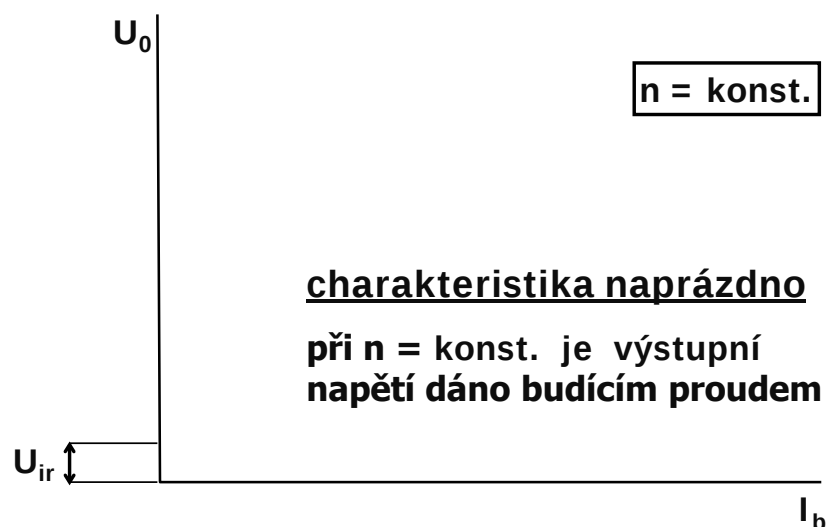
Po úpravě:

Velikost indukovaného napětí je dána budícím tokem (budícím proudem) a rychlostí otáčení stroje.

K1

Dynamo s cizím buzením stav naprázdno $U_0 = f(I_b)$, $n = \text{konst.}$

Zjednodušené náhradní schéma



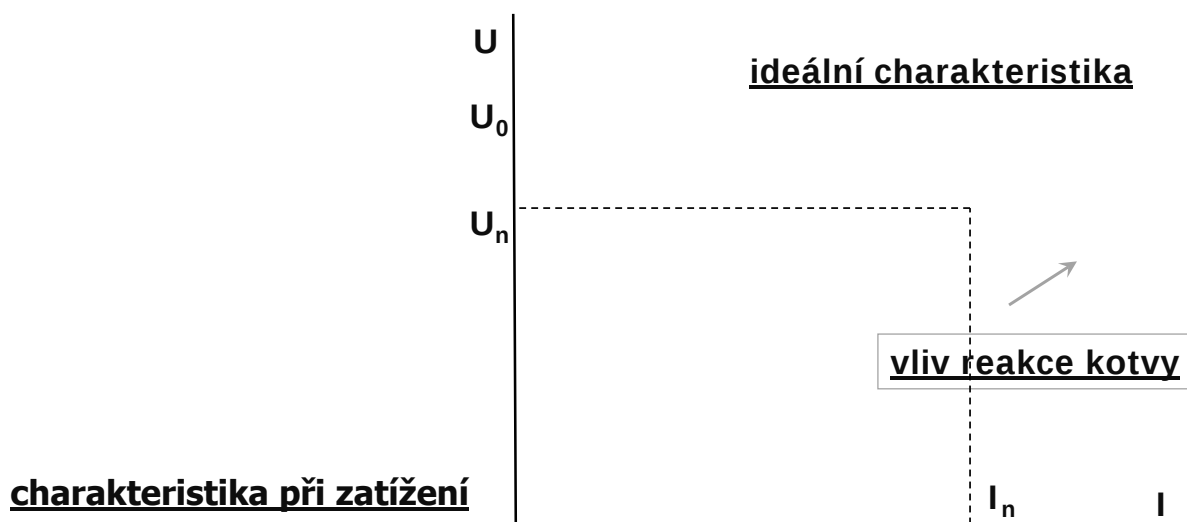
K1

Dynamo s cizím buzením stav při zatížení $U=f(I)$, $n=\text{konst.}$, $I_b = \text{konst}$

Podle 2. Kirchhoffova zákona platí:

$$U = U_i - R_i \cdot I = C_1 \cdot \phi \cdot n - R_i \cdot I - U_k - U_r$$

kde R_i je vnitřní odpor dynama

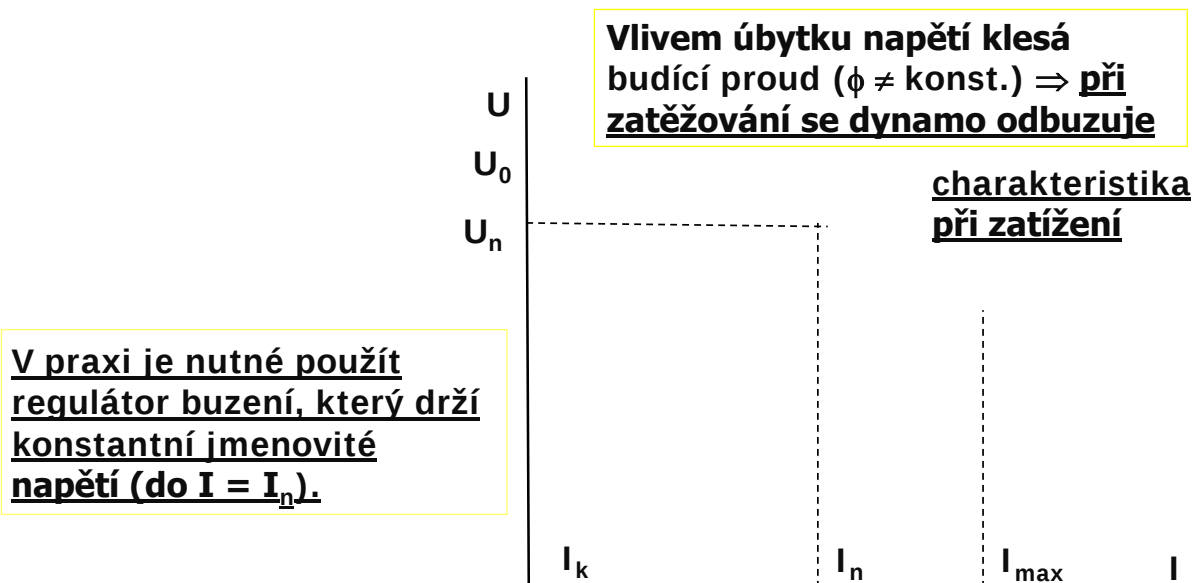


K1

Derivační dynamo stav při zatížení $U=f(I)$, $n=\text{konst.}$

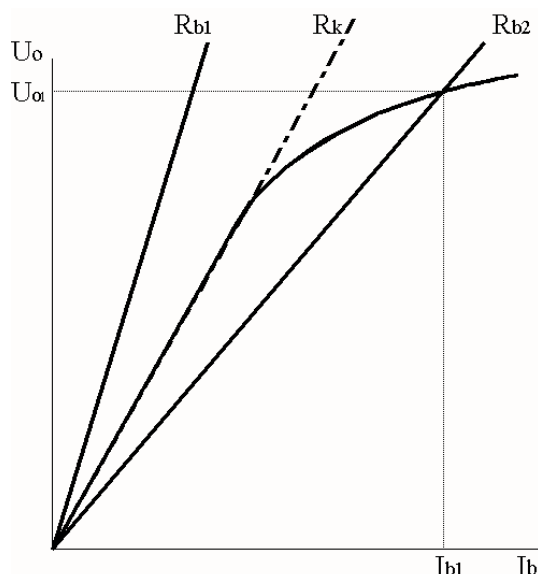
Pro obvod kotvy platí:

$$U = U_i - R_i \cdot I = C_1 \cdot \phi \cdot n - R_i \cdot I$$



K1

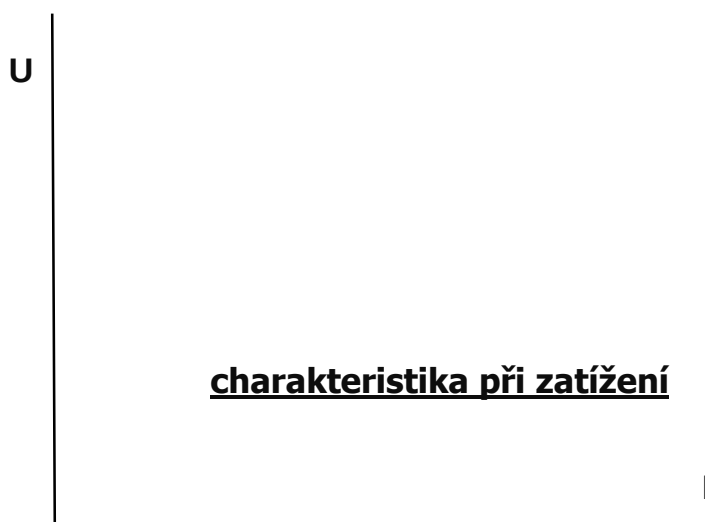
Derivační dynamo podmínky samonabuzení



1. Existence remanentního magnetismu
2. Správně připojené budící vinutí
3. Dynamo nezatížené
4. Otáčky větší než kritické
5. Odpor v budícím obvodu menší než kritický

K1

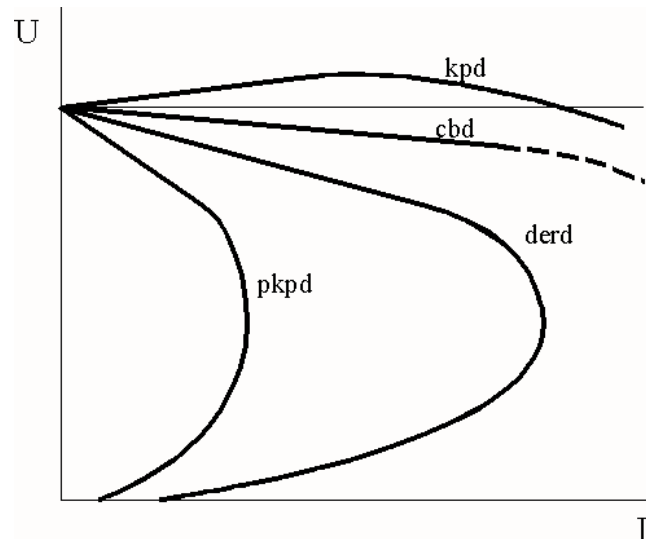
Sériové dynamo stav při zatížení $U=f(I)$, $n=\text{konst.}$



Provoz sériového dynama nemá smysl, výstupní napětí je dáno zátěží. Částečně sériového vinutí lze využít pro kompenzaci úbytku napětí derivačního dynama (kompaundní dynama).

Problematika sériového buzení se řeší při rekuperaci sériových motorů.

Kompaudní dynamo stav při zatížení $U=f(I)$, $n=\text{konst.}$



Stejnosměrné motory

Hlavní výhody stejnosměrných motorů:

- * jednoduchá regulace otáček změnou napětí
- * velký moment při nízkých rychlostech
- * velký rozsah regulace rychlosti
- * snadná změna směru otáčení

Většina výhod lze dnes uskutečnit i u střídavých strojů s polovodičovou regulací

Hlavní nevýhody stejnosměrných motorů:

- * složitá konstrukce, sběrací ústrojí, vysoká cena

Velikost indukovaného napětí na kotvě je stejné jako u dynama:

$$U_i = C_1 * \phi * n$$

Tažná síla, moment

Velikost tažné síly (momentu) na kotvě lze odvodit na základě silových účinků magnetického pole:

$$F = B * I * l \quad (N; T, A, m)$$

kde $B \approx \phi$

$I \approx$ zátěži stroje

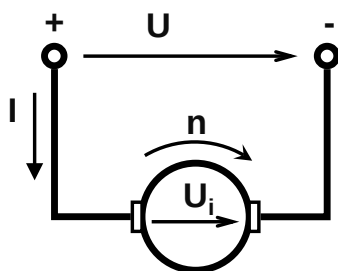
$l \approx$ konstrukce stroje, počet závitů, ...

Po úpravě lze vyjádřit moment:

Moment motoru je dán budícím tokem (budícím proudem) a proudem v kotvě.

K1

Otáčky motoru



Podle 2. Kirchhoffova zákona platí:

$$U = U_i + R_i * I = C_1 * \phi * n + R_i * I$$

kde R_i je vnitřní odpor motoru

Po úpravě jsou otáčky:

⇒ otáčky motoru jsou přímo úměrné napájecímu napětí
a nepřímo úměrné budícímu toku

⇒ moment motoru je dán budícím tokem a proudem

Stejnosměrné motory

U dynama sem předpokládaly konstantní otáčky, u motoru předpokládáme konstantní napětí (s výjimkou regulace).

Provozní charakteristiky

- * řídicí charakteristika v chodu naprázdno
- * momentová charakteristika
- * rychlostní charakteristika
- * mechanická charakteristika
- * regulační charakteristika
- * řídicí charakteristika při konstantním proudu

Motor s cizím (paralelním) buzením

Zjednodušené
náhradní schéma

Pro $n = 0$ platí:

$$U = U_i + R_i \cdot I_k = C_1 \cdot \phi \cdot n + R_i \cdot I_k = R_i \cdot I_k$$

$$\Rightarrow I_k = U / R_i$$

**vnitřní odpor motoru je zanedbatelný
(okolo 1Ω) $\Rightarrow$ velký proudový ráz**

Možnosti snížení proudového rázu ($I \leq 2,5I_n$):

- * zařazení odporu do obvodu kotvy – ztrátové.
Použití u pohonů, kde není požadavek regulace rychlosti a s malou četností rozběhů.
- * snížením napájecího napětí (polovodičová regulace).

Momentová a rychlostní charakteristika

Momentová charakteristika

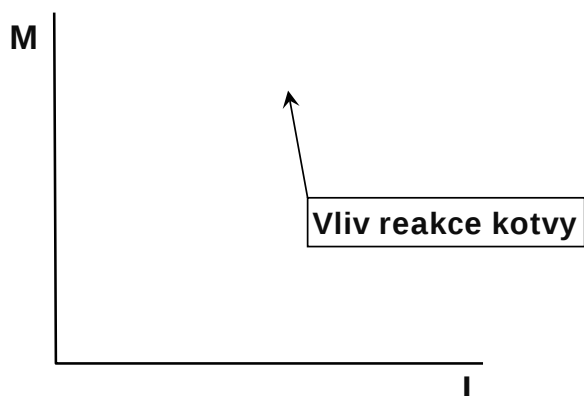
$$M = f(I)$$

$$M = C_2 * \phi * I$$

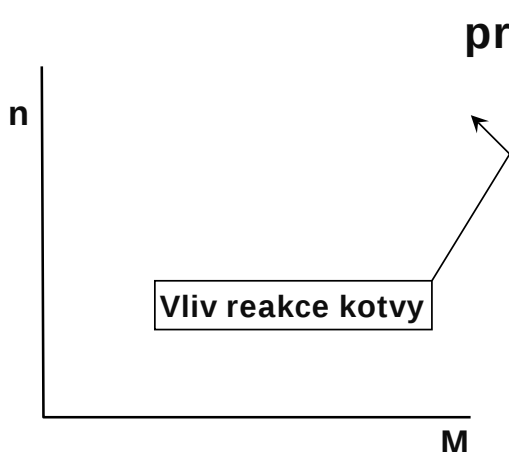
pro $\phi = \text{konst.}$

$$M = k * I$$

$$\text{pro } \phi = \text{konst.} \Rightarrow n = k_1 - k_2 * I$$



Mechanická charakteristika - $n = f(M)$



$$\text{pro } \phi = \text{konst.} \Rightarrow n = k_1 - k_2 * M$$

- * tvar mechanické charakteristiky je obdobný jako u rychlostní charakteristiky
- * pokles otáček se zatížením je velmi malý
- * v důsledku reakce kotvy hrozí nárůst otáček a přechod do nestabilního stavu

Sériový motor

Zjednodušené
náhradní schéma

Úprava základních vztahů:

a) indukované napětí

$$U_i = C_1 * n * \phi = C_3 * n * I$$

b) moment motoru

$$M = C_2 * \phi * I = C_4 * I^2$$

* pro sériový motor platí, že zatěžovací proud je zároveň budící $I = I_b \Rightarrow$ budící proud závisí na zatížení.

* pro zjednodušení se předpokládá, že magnetický tok je přímo úměrný zatěžovacímu proudu (neuvažuje se vliv reakce kotvy).

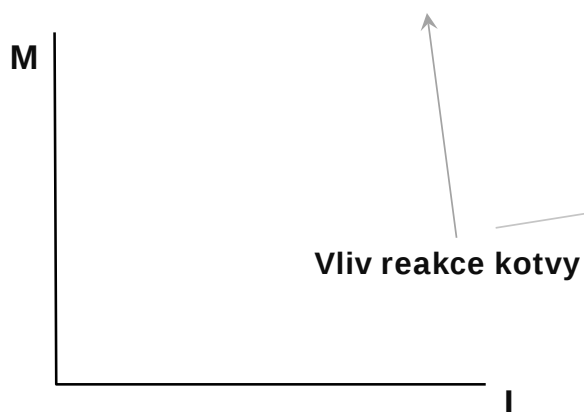
Momentová a rychlostní charakteristika

Momentová charakteristika

Rychlostní charakteristika $n = f(I)$

$$M = f(I)$$

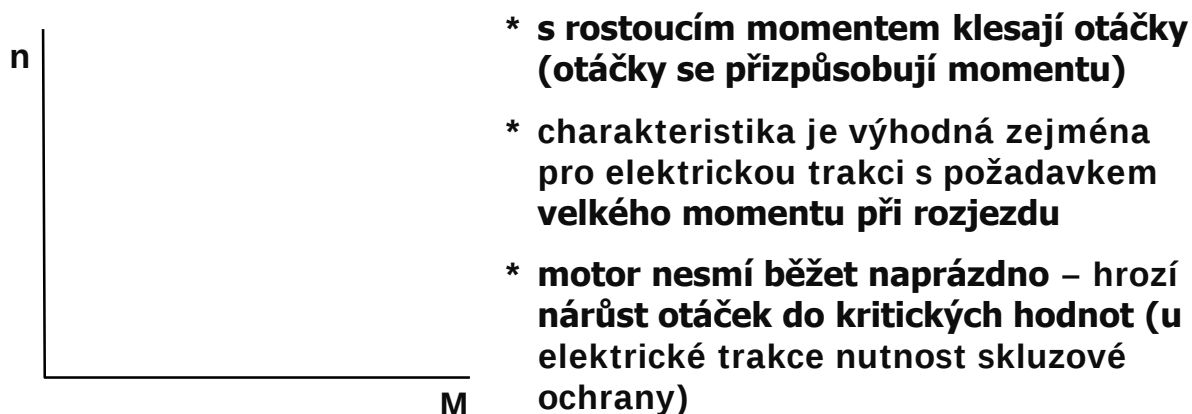
$$M = C_4 * I^2$$



Vlivem reakce kotvy se
charakteristika linearizuje



Mechanická charakteristika - $n = f(M)$



Zhodnocení stejnosměrné motory

U stejnosměrných motorů nesmí dojít ke ztrátě buzení $\Rightarrow$ rychlý nárůst otáček do nebezpečných hodnot.

Při rozběhu je třeba splnit podmínky pro proudový ráz (řeší se zpravidla regulací napájecího napětí).

1. Motor s cizím buzením (derivační motor)

- * konstantní otáčky při různém zatížení $\Rightarrow$ tvrdá mechanická charakteristika
- * změna zátěže se projevuje proudovými rázy do sítě $\Rightarrow$ vhodné pro pohony s konstantní zátěží

2. Motor se sériovým buzením

- * otáčky se přizpůsobují zátěži $\Rightarrow$ měkká mechanická charakteristika
- * motor se nesmí odlehčit (vliv na provedení převodů, ochrany)
- * motory jsou vhodné pro elektrickou trakci

Regulace otáček

Regulace otáček stejnosměrných motorů je výhodná a patří k hlavním výhodám stejnosměrných motorů.

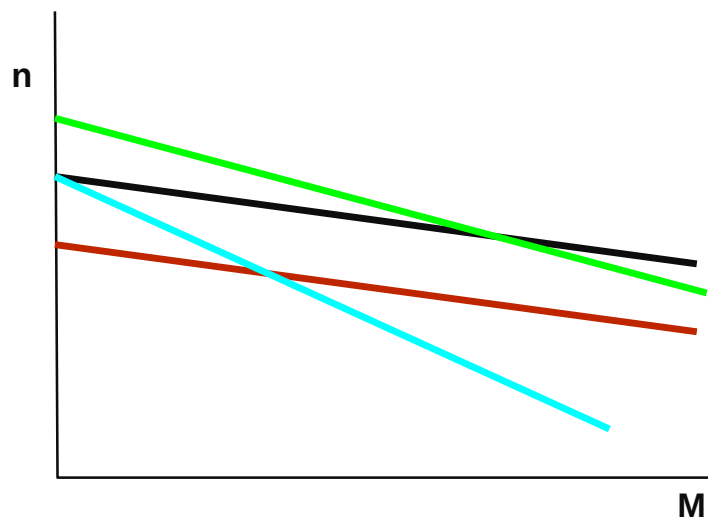
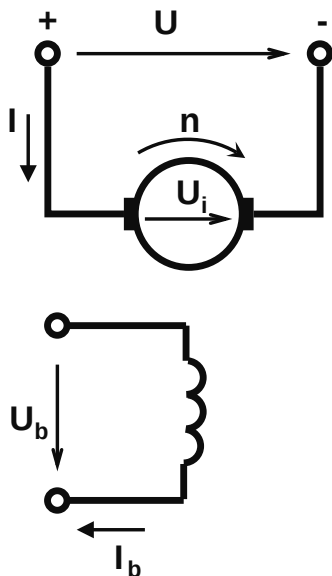
Možnosti regulace z odvození mechanické charakteristiky:

$$U = U_i + R_i * I = C_1 * n * \phi + R_i * I = C_1 * n * \phi + R_i * \frac{M}{C_2 * \phi}$$
$$\Rightarrow n = \frac{U - R_i * \frac{M}{C_2 * \phi}}{C_1 * \phi} = \frac{U}{C_1 * \phi} - \frac{R_i}{C_1 * C_2 * \phi^2} * M$$

1. Změnou napětí na kotvě (pulsní měnič nebo řízený usměrňovač)
2. Změnou buzení (zpravidla odbuzování)
3. Zvýšením odporu v obvodu kotvy (ztrátová regulace)

K1

Motor s cizím buzením - principy regulace

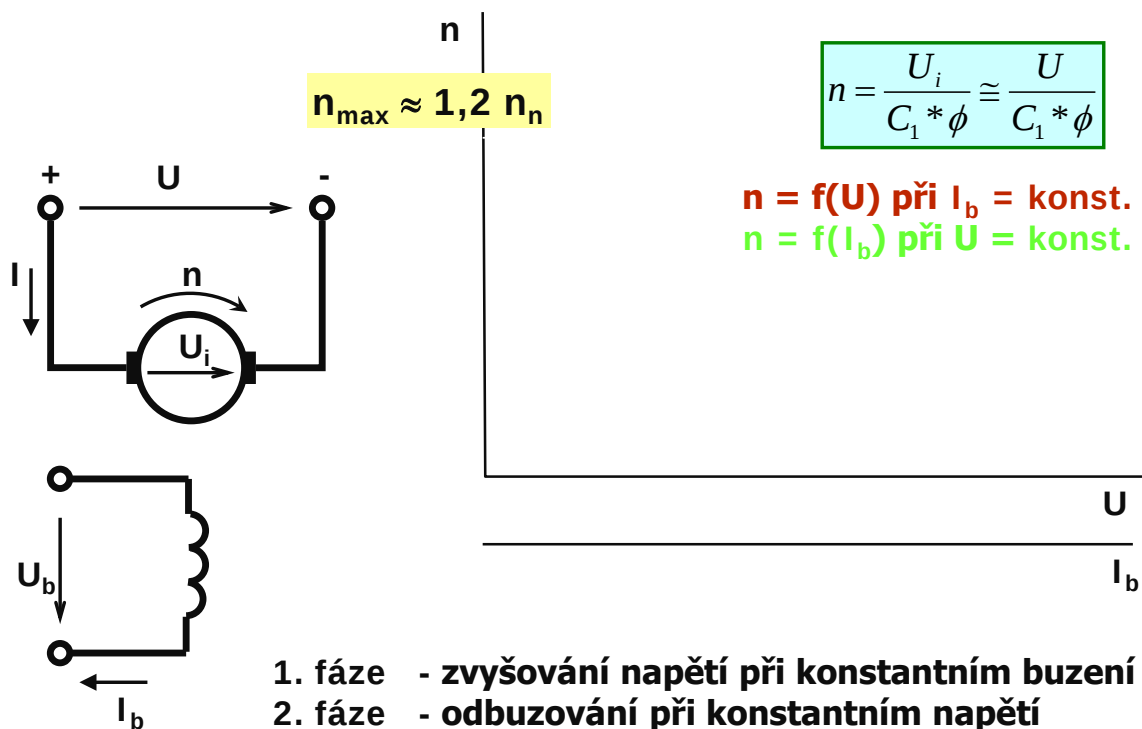


Rovnice regulace:

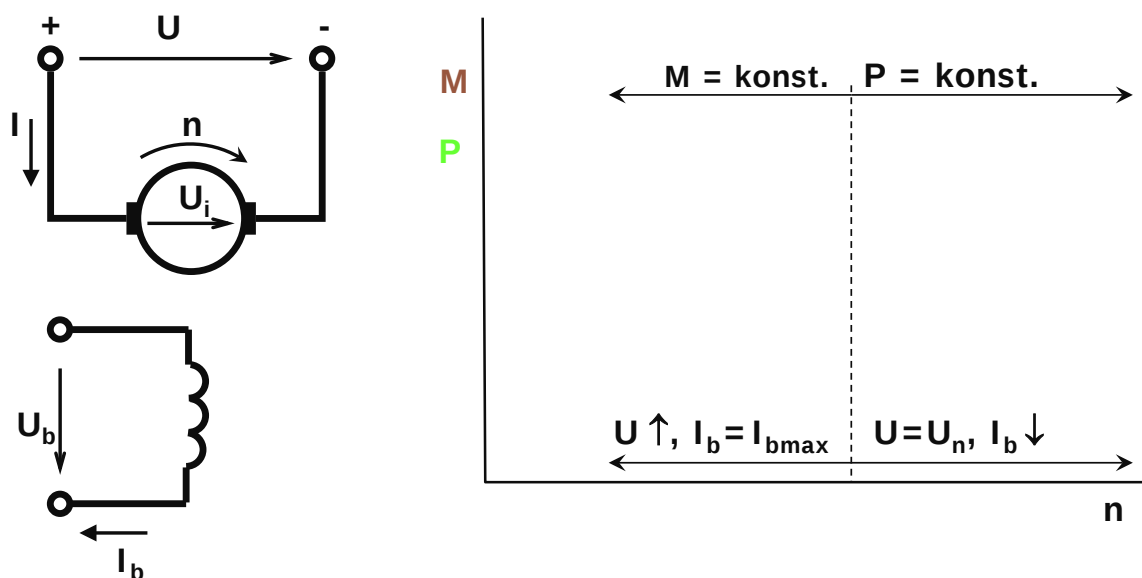
$$n = \frac{U}{C_1 * \phi} - \frac{R_i}{C_1 * C_2 * \phi^2} * M$$

1. Základní (přirozená) charakteristika
2. Regulace změnou napětí (snížení U)
3. Regulace změnou buzení (odbuzení)
4. Regulace odporem kotvě (zvýšení R)

CBM - řídící charakteristika, stav naprázdno



CBM - řídící charakteristika, $I = \text{konst.}$



$I_b = I_{b\max} = \text{konst.}$

$U = U_n$

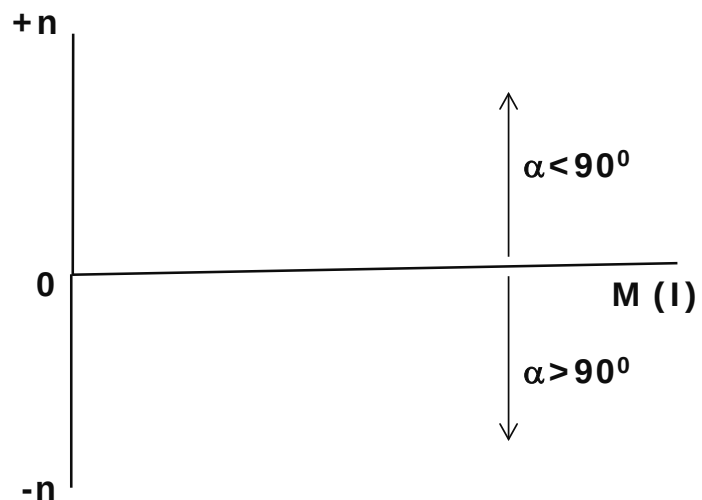
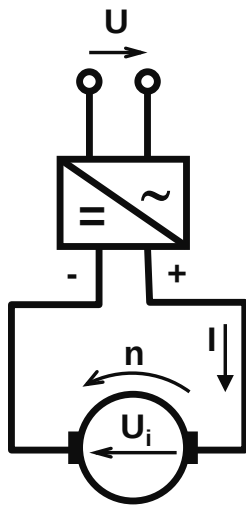
$P \approx U * I \approx U \approx n$

$P \approx U * I \approx \text{konst.}$

$M \approx \phi * I \approx \text{konst.}$

$M \approx \phi * I \approx U/n \approx 1/n$

Regulace otáček změnou napájecího napětí



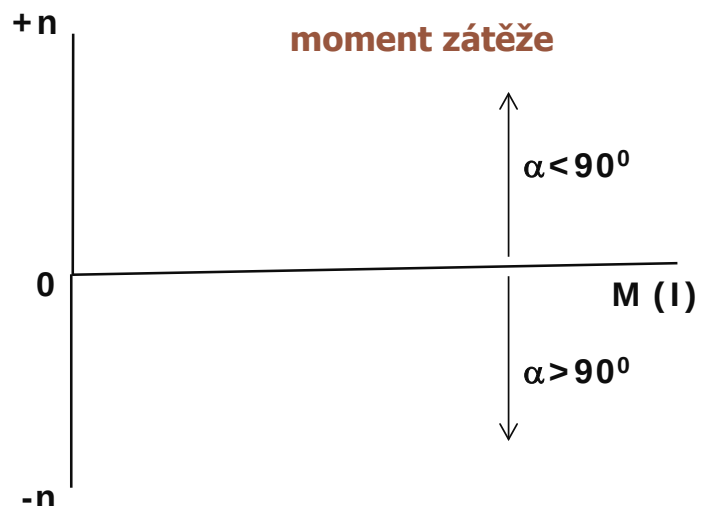
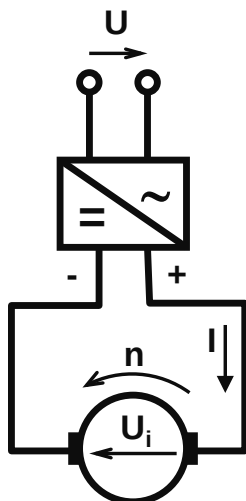
Rovnice regulace:

$$n = \frac{U}{C_1 * \phi} - \frac{R_i}{C_1 * C_2 * \phi^2} * M$$

- * vlivem úbytku napětí na usměrňovači je větší sklon charakteristik
- * charakteristiky jsou v 1. a 4. kvadrantu
- * sít' charakteristik je spojitá
- * směr otáčení je dán úhlem otevření
- * proud kotvy je vždy kladný

K1

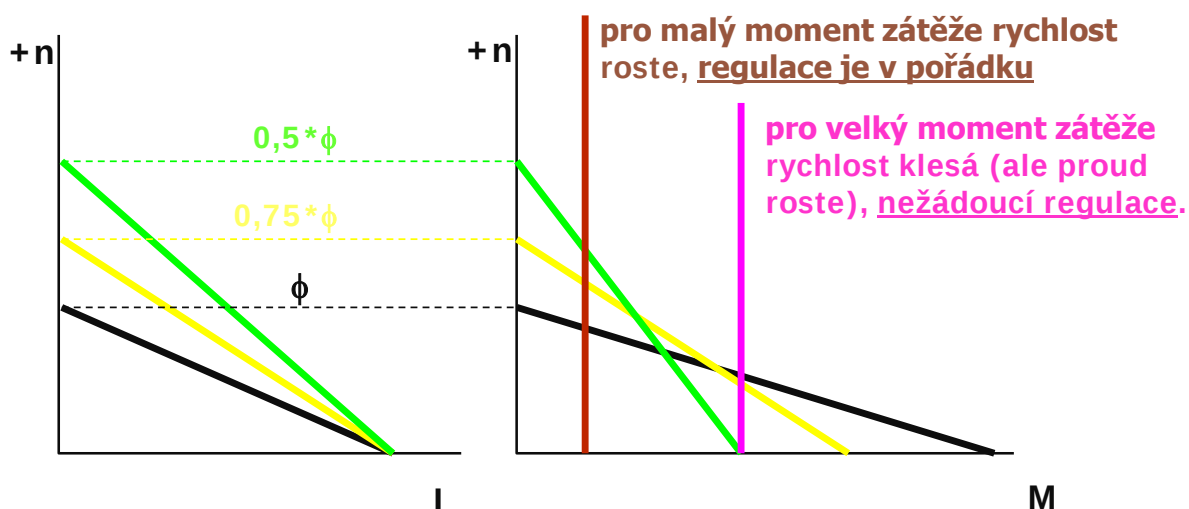
Regulace otáček změnou napájecího napětí



Při požadavku reverzace lze použít pouze pro aktivní zátěž (1. a 4. kvadrant), například pro jeřáb. Při změně polarity napětí se musí změnit i směr otáčení, aby proud zůstal kladný.

$$U = U_i + R_i * I = C_1 * n * \phi + R_i * I \Rightarrow I = \frac{U - C_1 * n * \phi}{R_i} > 0$$

Regulace otáček změnou buzení



$$n = f(I): \quad n = \frac{U - R_i * I}{C_1 * \phi}$$

pro $n=0$ je I nezávislý
na budícím toku:

$$I = \frac{U}{R_i}$$

$$n = f(M)$$

$$n = \frac{U}{C_1 * \phi} - \frac{R_i}{C_1 * C_2 * \phi^2} * M$$

pro $n=0$ platí:

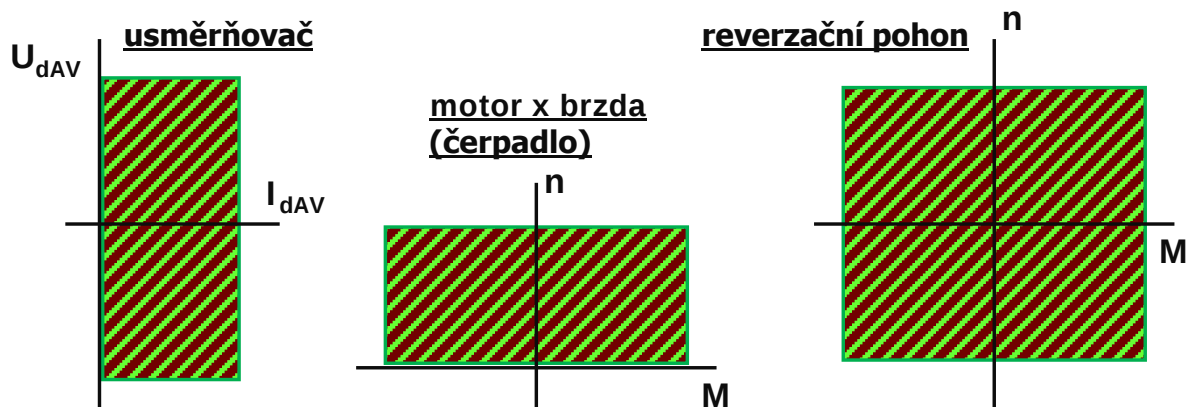
$$M = \frac{C_2 * U}{R_i} * \phi$$

Reverzační pohony

Pohony bez další úpravy s jedním usměrňovačem lze použít pouze v 1. a 4. kvadrantu – proud usměrňovačem může protékat pouze jedním směrem.

U náročnějších pohonů požadujeme různé provozní stavy – stroj musí být schopen pracovat:

- * v 1. a 2. kvadrantu (motor x brzda)
- * ve všech kvadrantech (reverzační motor x brzda).



Reverzační pohon s jedním usměrňovačem

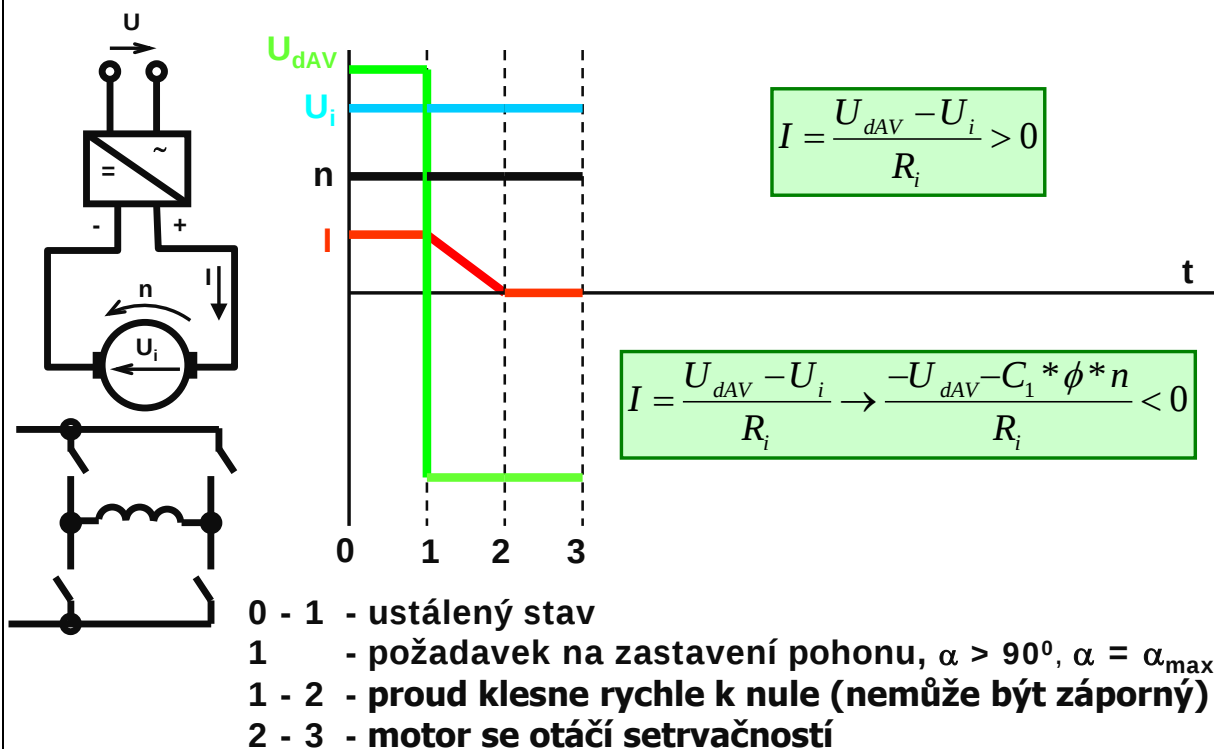
Pro pohon je použit řízený usměrňovač, u motoru lze přepínat polaritu buzení (přepínání polarity v kotvě je jednodušší, ale u středních a větších výkonů se nepoužívá).

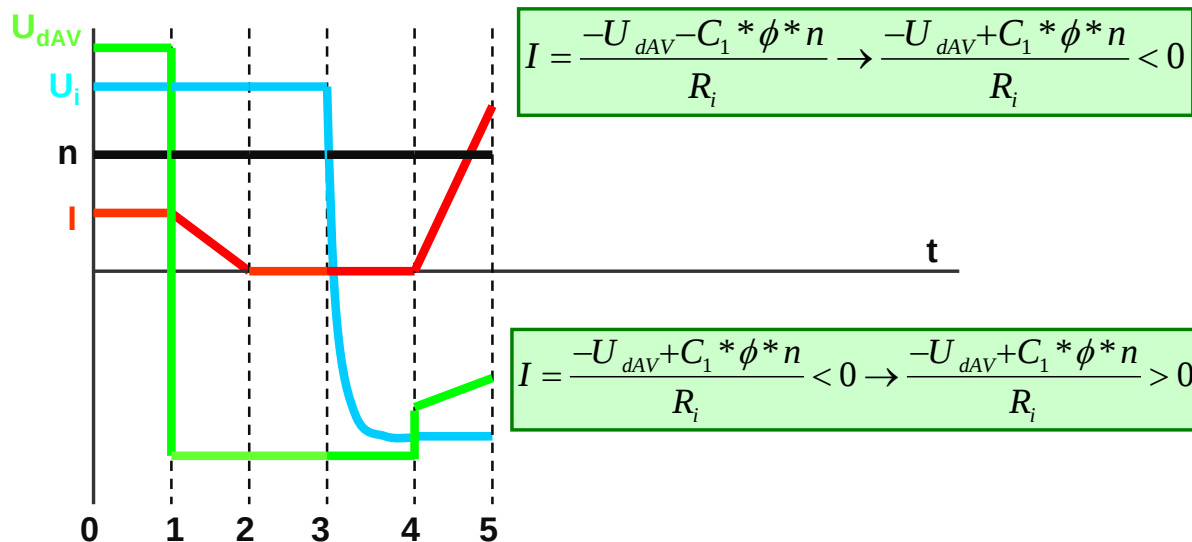
Nevýhodou regulace je malá dynamika pohonu. Rychlost změny otáček je dána časovou konstantou pro „přebuzení“ budícího vinutí a může trvat až několik sekund.

Při regulaci musí platit kladný směr proudu v kotvě $\Rightarrow$

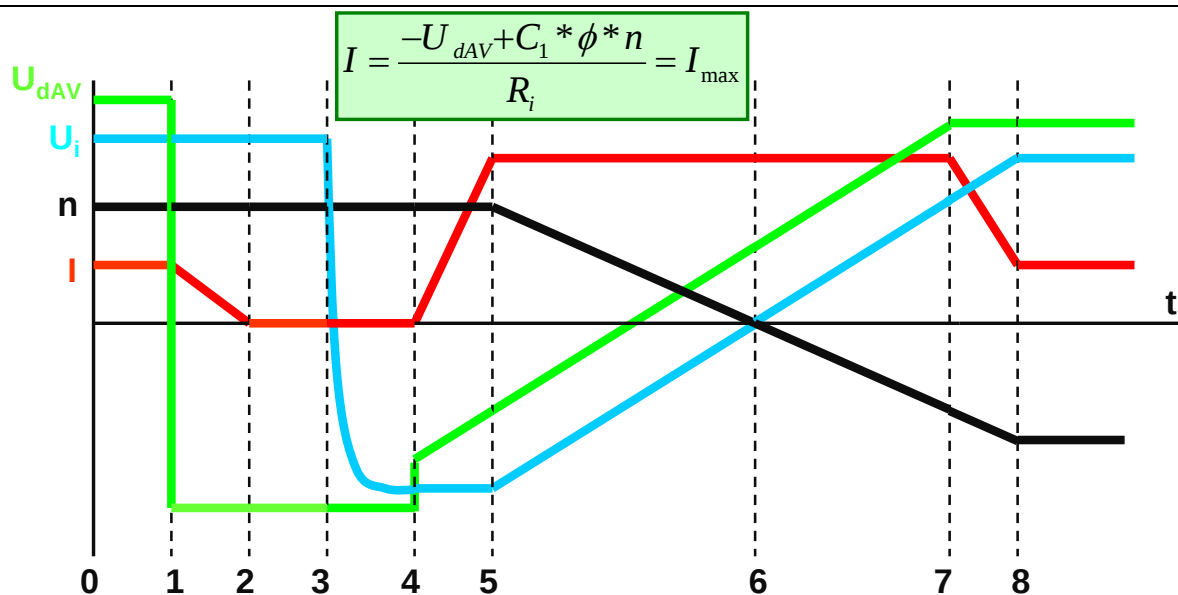
$$I = \frac{U_{dAV} - U_i}{R_i} = \frac{U_{dAV} - C_1 * \phi * n}{R_i} \geq 0$$

Reverzační pohon s jedním usměrňovačem





- 3 - změna polarity v budícím obvodu
- 3 - 4 - přechodný děj $\Rightarrow U_i < 0, |-U_{dAV} + U_i| < 0 \Rightarrow I = 0$
- 4 - snížení U_{dAV}
- 4 - 5 - $|-U_{dAV} + U_i| > 0 \Rightarrow I > 0 \Rightarrow$ brzdný moment > 0 , nárůst proudu do $I = I_{max}$
- 5 - otáčky začínají klesat, na řídicí úhel usměrňovače působí regulátor proudu $\Rightarrow I = I_{max}$



- 5 - 6 - s poklesem otáček klesá indukované napětí, regulátor prostřednictvím řídicího úhlu drží $I = I_{max}$ a $M = M_{bmax}$
- 6 - motor se zastaví $\Rightarrow U_i = 0$
- 6 - 7 - s dalším nárůstem U_{dAV} se motor roztočí opačným směrem, proud zůstává kladný a je dán regulátorem, platí $I = I_{max}$
- 7 - ukončení regulace $U_{dAV}, U_{dAV} = U_{dAVmax}$
- 7 - 8 - motor má převahu momentu, otáčky se zvýší a ustálí, $I = I_n$
- 8 - ustálený stav

Reverzační pohon se dvěma usměrňovači

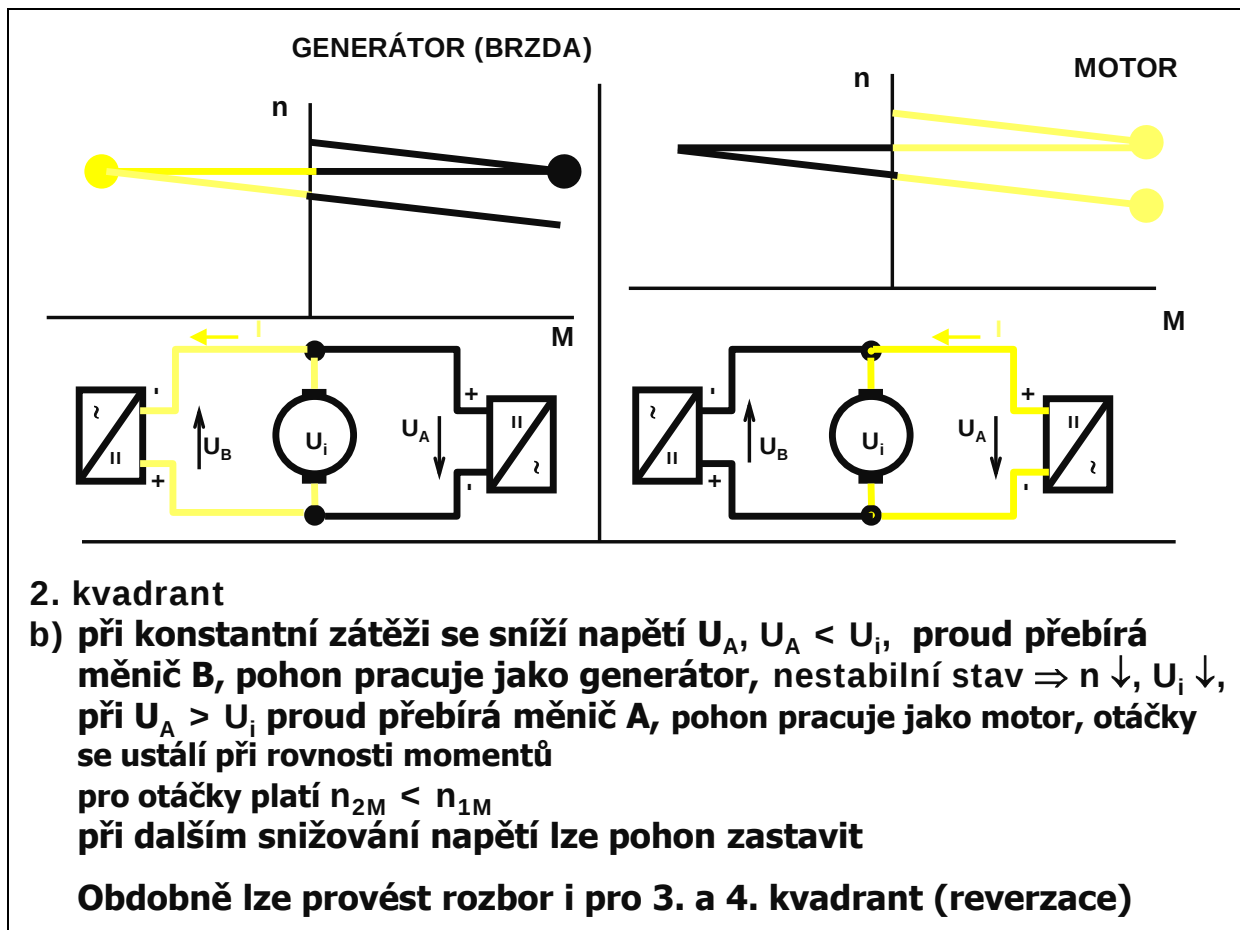
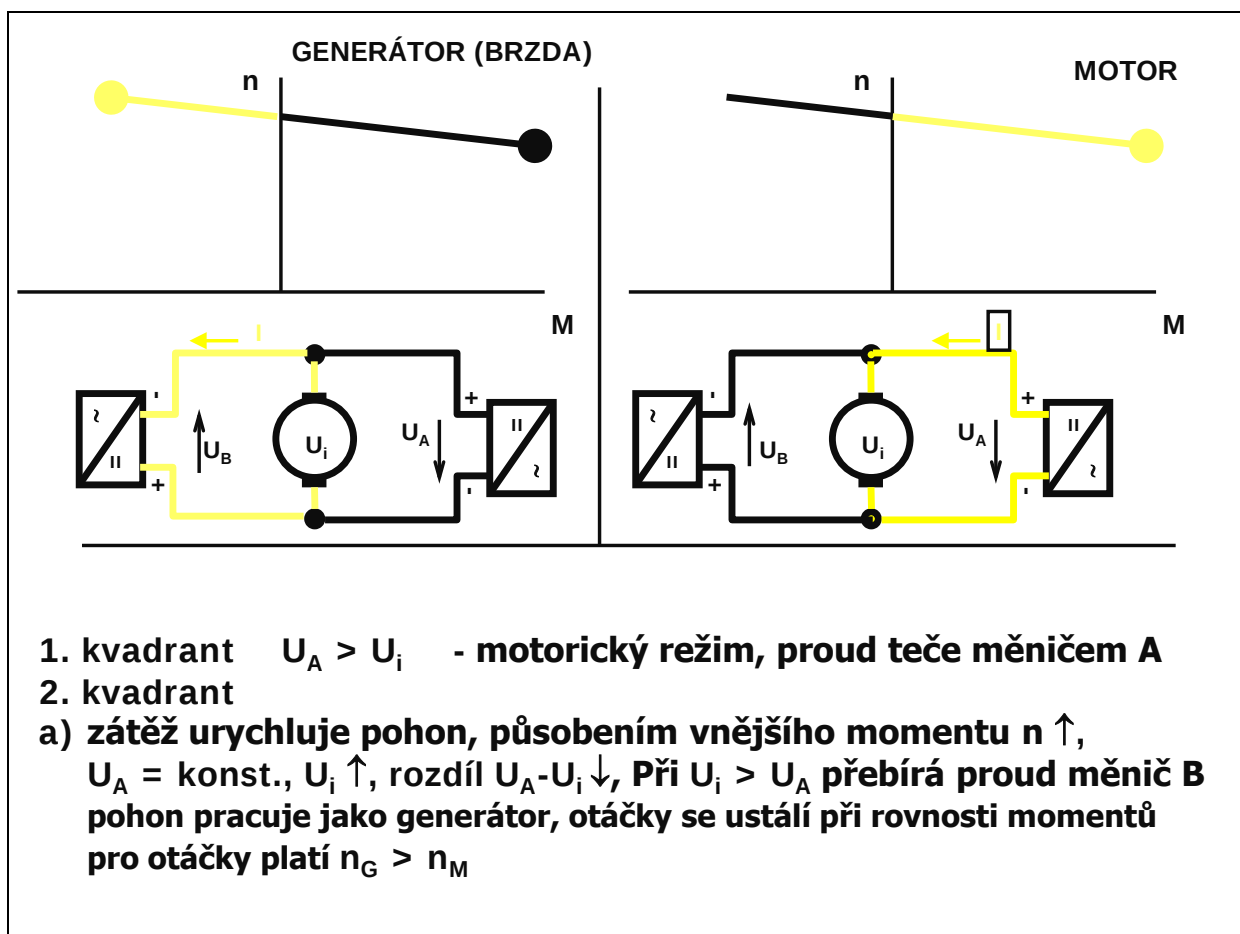
- * L, R - vnitřní odpor a indukčnost vinutí kotvy
- * L_{TL} - tlumivky pro vyhlazení proudu (omezení okruhových proudů)
- * usměrňovače pracují v antiparalelním zapojení
- * každý usměrňovač je určen pro jeden směr proudu
- * vždy pracují oba měniče – jeden jako usměrňovač, druhý jako invertor

Reverzační pohon se dvěma usměrňovači

Musí platit: souhlasné řízení : $U_B = -U_A$
 (v ideálním případě netečou obvodem žádné okruhové proudy – platí
 pouze pro $\alpha_A > 120^\circ$) $U_{dAV}(0) \cdot \cos\alpha_B = -U_{dAV}(0) \cdot \cos\alpha_A$

$$\cos\alpha_B = -\cos\alpha_A$$

$$\alpha_B = 180 - \alpha_A$$



Motor s cizím buzením – principy brzdění

Základní principy:

1. Dynamické brzdění

- * brzdění do odporu
- * brzdění protiproudem
 - aktivní zátěž
 - pasivní zátěž

Energie je spalována v brzdných odporech

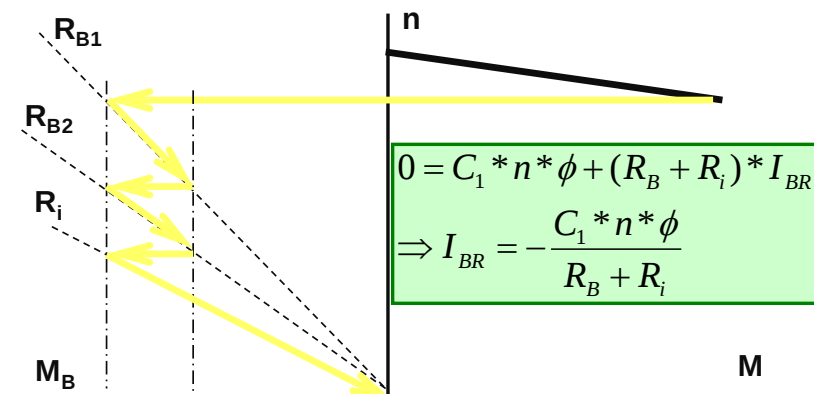
2. Rekuperační brzdění

Energie je dodávána zpět do sítě (zdroj musí být schopen rekuperovanou energii přijmout)

Brzdění do odporu

Základní princip:

- * stroj (kotva) se odpojí od zdroje, buzení zůstává připojeno
- * do obvodu kotvy se zařadí odpor
- * směr indukovaného napětí se nemění
- * stroj pracuje jako generátor do odporu
- * $n \downarrow, U_i \downarrow, I_{BR} \downarrow, M_{BR} \downarrow$
- * k udržení brzdného momentu se brzdný odpor postupně snižuje, až na $R_B = 0$
- * motor je třeba dobrzdit mechanicky



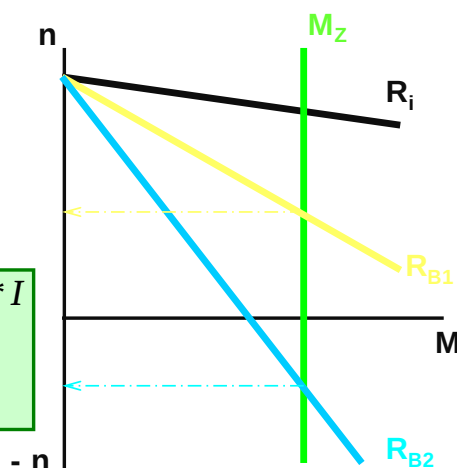
Brzdění protiproudem

Aktivní zátěž - základní princip:

- * do obvodu kotvy se zařadí odpor, napájení kotvy a buzení se nemění
- * při odporu R_{B1} rychlost břemene klesá
- * při odporu R_{B2} břemeno klesá ($n < 0$)
- * po ustálení otáčky zůstávají konstantní
- * značné ztráty v brzdě odporu
- * možné využití – jeřáby

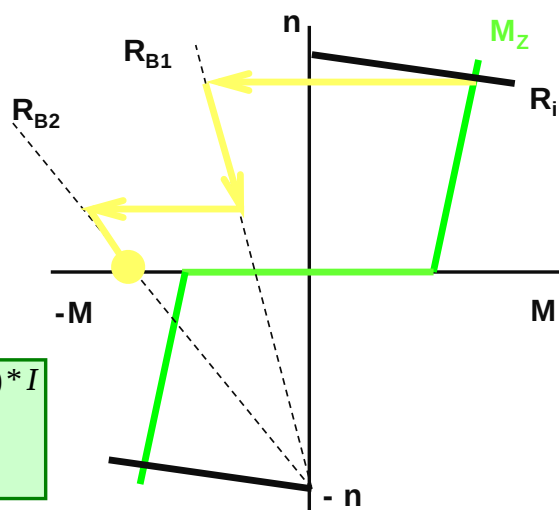
$$U = -C_1 * n * \phi + (R_{B2} + R_i) * I$$

$$\Rightarrow I = \frac{U + C_1 * n * \phi}{R_{B2} + R_i}$$



Pasivní zátěž - Základní princip:

- * změna polarity napětí na kotvě
- * přechod do 3. kvadrantu
- * nutné snížení proudu v kotvě – R_{B1} , R_{B2}
- * nestabilní stav, otáčky klesají
- * po zastavení se kotva odpojí od sítě
- * v opačném případě se motor roztočí na druhou stranu



$$-U = C_1 * n * \phi + (R_{B1} + R_i) * I$$

$$\Rightarrow I = -\frac{U + C_1 * n * \phi}{R_{B1} + R_i}$$

Brzdění protiproudem

Rekuperační brzdění

- * kinetická energie brzděného pohonu se změně na energii elektrickou
 - * síť musí být schopna danou energii přijmout – v soustavě musí být další spotřebiče, které tuto energii využijí
 - * v opačném případě dojde ke zvýšení napětí a k následnému zapůsobení ochran
 - * principy byly popsány v kapitole reverzační pohony
1. zátěž urychluje pohon, napětí U_{dAV} je konstantní, $U_i > U_{dAV} \Rightarrow$ z motoru se stane generátor, rychlost se ustálí při rovnováze momentů.
 2. zátěž je konstantní, napětí U_{dAV} klesá, pohon přejde do 2. kvadrantu, zde ale není pracovní bod stabilní $\Rightarrow$ otáčky a U_i klesají, pohon se vrátí do 1. kvadrantu, otáčky se ustálí. Po dalším snížení U_{dAV} lze pohon lze zastavit.

Sériový motor – principy regulace

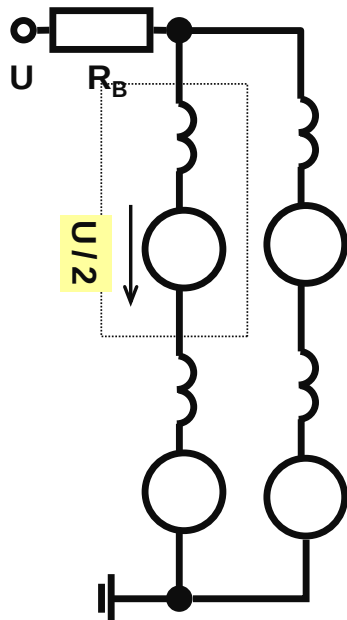
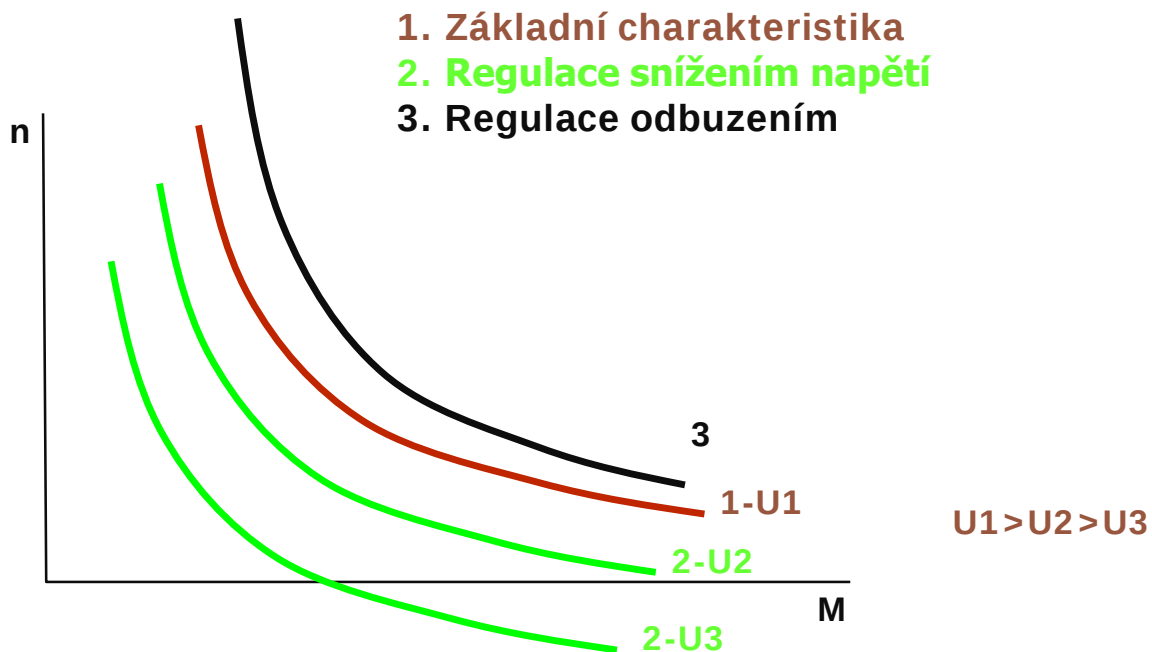
1. Regulace změnou napětí na kotvě
 - * řízený usměrňovač – střídavé sítě
 - * pulsní měnič – stejnosměrné sítě
2. Regulace změnou buzení (zvyšování rychlosti při sníženém momentu)
3. Regulace řazením do paralelních a sériových skupin (využití u vícemotorových skupin hlavně při rozběhu)

Reverzace sériového motoru:

- * změna polarita napětí na kotvě
- * změna polarita napětí na buzení

Při reverzaci se nesmí změnit polarita proudu v budícím vinutí (motor má vlastní buzení a odbudil by se).

Sériový motor - principy regulace

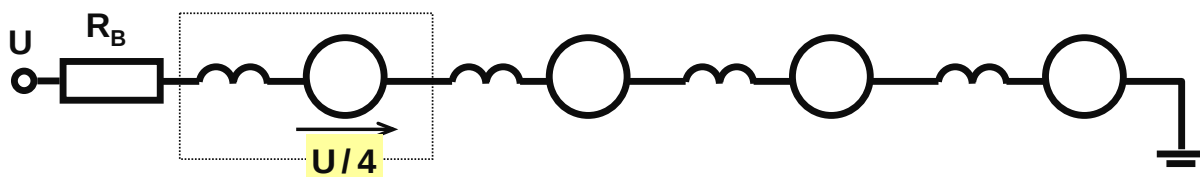


Regulace řazením do hospodárných skupin

- * využití u vícemotorových skupin
- * obecné možnosti:
 - všechny motory do série
 - sérioparalelní řazení
 - všechny motory paralelně (pro vyšší napájecí napětí nelze použít)

Hlavní význam je při rozběhu prostřednictvím rozběhového odporu a umožňuje snížení ztrát

Při rozběhu jsou všechny motory do série, po vyřazení rozběhového odporu se zapojí sérioparalelní skupina + rozběhový odpor.



Sériový motor - brzdění

1. Brzdění do odporu
2. Brzdění protiproudem
 - * aktivní zátěž
 - * pasivní zátěž
3. Brzdění rekuperací – sériové dynamo nelze použít jako zdroj napětí, rekuperace lze pouze při napájení motoru z pulsního měniče

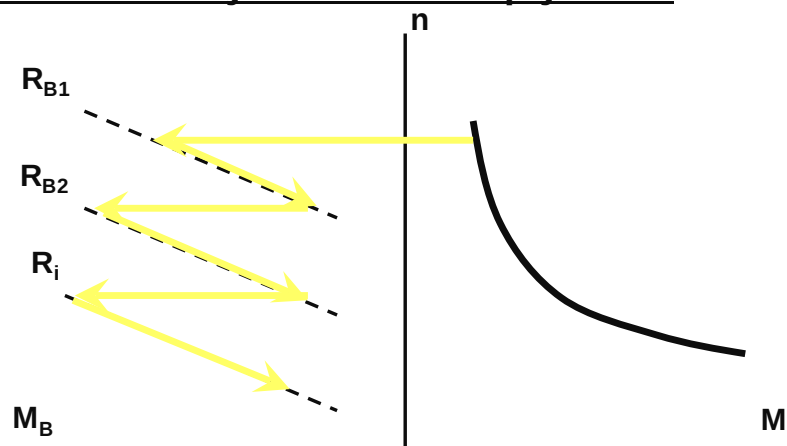
Sériový motor - brzdění do odporu

1. Motor se odpojí od zdroje, změní se polarita budícího vinutí a na svorky se připojí brzdový rezistor
2. Při poklesu otáček klesá i brzdový moment, brzdné odpory se postupně snižují
3. Motor se musí dobrzdit mechanicky

Výhoda – brzdění je nezávislé na napájecí síti !

$$0 = C_1 * n * \phi + (R_{B1} + R_i) * I$$

$$\Rightarrow I = - \frac{C_1 * n * \phi}{R_{B1} + R_i}$$



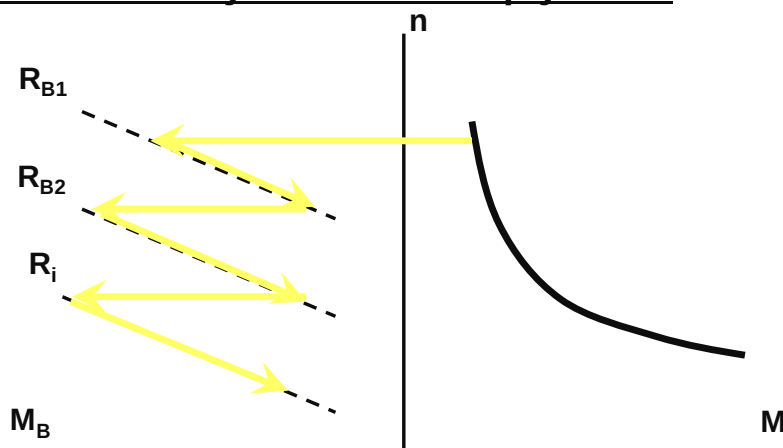
Sériový motor - brzdění do odporu

1. Motor se odpojí od zdroje, změní se polarita budícího vinutí a na svorky se připojí brzdný rezistor
2. Při poklesu otáček klesá i brzdný moment, brzdné odpory se postupně snižují
3. Motor se musí dobrzdit mechanicky

Výhoda - brzdění je nezávislé na napájecí síti !

$$0 = C_1 * n * \phi + (R_{B1} + R_i) * I$$

$$\Rightarrow I = - \frac{C_1 * n * \phi}{R_{B1} + R_i}$$

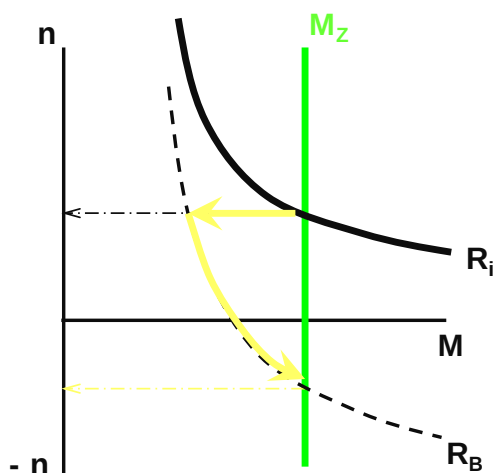


Brzdění protiproudem - aktivní zátěž

1. Do obvodu kotvy se připojí rezistor
2. Pracovní bod přejde na novou charakteristiku a začne se po ní posouvat do nového pracovního bodu $\Rightarrow$ zátěž se začne pohybovat opačně, rychlost se ustálí

$$U = -C_1 * n * \phi + (R_{B1} + R_i) * I$$

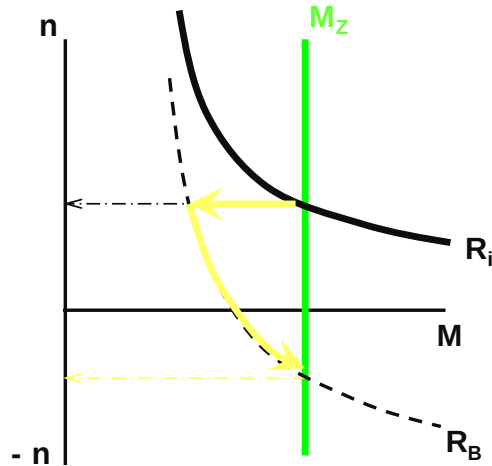
$$\Rightarrow I = \frac{U + C_1 * n * \phi}{R_{B1} + R_i}$$



Brzdění protiproudem - aktivní zátěž

1. Do obvodu kotvy se připojí rezistor
2. Pracovní bod přejde na novou charakteristiku a začne se po ní posouvat do nového pracovního bodu $\Rightarrow$ zátěž se začne pohybovat opačně, rychlost se ustálí

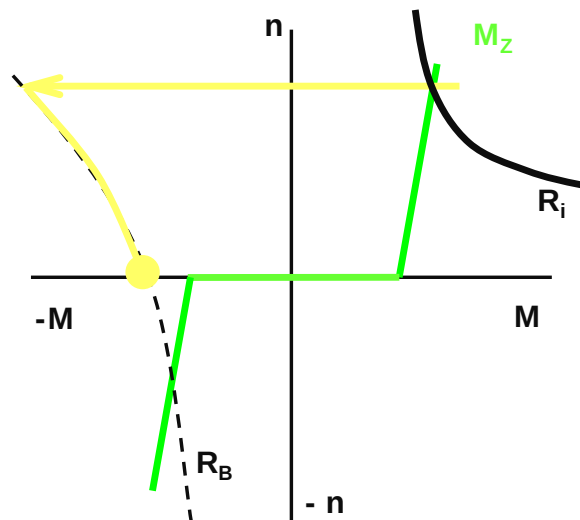
$$U = -C_1 * n * \phi + (R_{B1} + R_i) * I$$
$$\Rightarrow I = \frac{U + C_1 * n * \phi}{R_{B1} + R_i}$$



Brzdění protiproudem - pasivní zátěž

1. Změníme polaritu napětí zdroje, přepojíme budící vinutí a do obvodu kotvy zapojíme rezistor
2. Pracovní bod se posune na charakteristiku R_B , posunuje se do stabilního bodu, rychlost klesá.
3. Po zastavení motoru dojde k odpojení od sítě

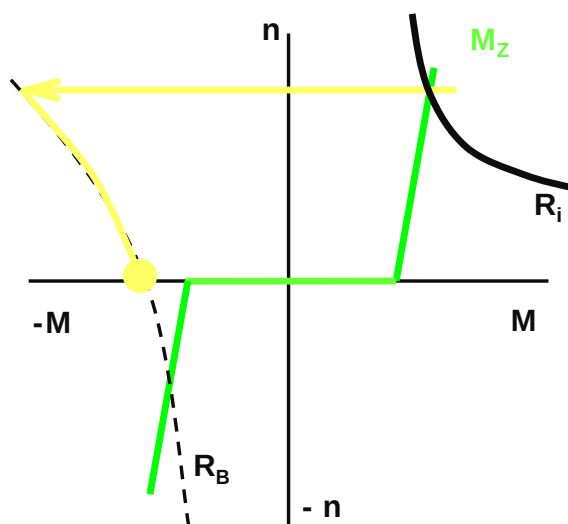
$$-U = C_1 * n * \phi + (R_B + R_i) * I$$
$$\Rightarrow I = -\frac{U + C_1 * n * \phi}{R_B + R_i}$$



Brzdění protiproudem – pasivní zátěž

1. Změníme polaritu napětí zdroje, přepojíme budící vinutí a do obvodu kotvy zapojíme rezistor
2. Pracovní bod se posune na charakteristiku R_B , posunuje se do stabilního bodu, rychlost klesá.
3. Po zastavení motoru dojde k odpojení od sítě

$$\begin{aligned} -U &= C_1 * n * \phi + (R_B + R_i) * I \\ \Rightarrow I &= -\frac{U + C_1 * n * \phi}{R_B + R_i} \end{aligned}$$



Příklady:

Příklad 1

Stejnoseměrný motor s cizím buzením má tyto údaje: $P_{2N} = 45 \text{ kW}$, $U_N = 440 \text{ V}$, $I_N = 114 \text{ A}$, $n_N = 1400 \text{ min}^{-1}$, $R_i = 0,2 \Omega$.

Určete:

- a) mechanickou charakteristiku motoru $n = f(M)$ pro jmenovité napájecí napětí.
- b) pro snížené napájecí napětí $U = 0,5 \cdot U_N$ při konstantním buzení $F = F_N$. Mechanické charakteristiky nakreslete.

Příklad 2

Stejnoseměrný cizí buzený motor s údaji : $U_N = 200 \text{ V}$, $n_N = 930 \text{ min}^{-1}$, $I_N = 60 \text{ A}$, $n_0 = 955 \text{ min}^{-1}$ (otáčky při chodu naprázdno) má pracovat při otáčkách $n = 730 \text{ min}^{-1}$ a při jmenovitém zatížení, tj. s proudem kotvy $I_N = 60 \text{ A}$.

Určete velikost předřadného odporu R_p , který je třeba zařadit do obvodu kotvy, aby otáčky klesly na uvedenou hodnotu. Buzení motoru je konstantní.

Příklad 3

DC motor s cizím buzením s údaji: $R=0,4\Omega$, napájení z DC sítě $U=220V$. V nezatíženém stavu se kotva motoru otáčí rychlostí $\Omega_0 = 157,08 \text{ rad} \times \text{s}^{-1}$. Buzení je konstantní, jmenovité. Moment mechanických ztrát při chodu naprázdno zanedbejte.

Určete jak bude vypadat mechanická charakteristika DC motoru pro toto zadání ?
Nakreslete ji v příslušném měřítku.

Příklad 4

DC motor o výkonu $P_2 = 10 \text{ kW}$, napájený napětím $U = 110 \text{ V}$, pracuje denně 8 hodin při účinnosti $\eta = 0,75$.

Určete:

- a) jaká je spotřeba ?
- b) jaká je cena odebrané elektrické energie za dobu 25 dnů, je-li sazba $3,7 \text{ Kč/kWh}$?

Příklad 5

Kolik stejných DC motorů, každý o stálém příkonu $P_1 = 3 \text{ kW}$, může pracovat po dobu 24 hodin, je-li denní spotřeba elektrické energie omezena na $W_e = 586 \text{ kWh}$?

Příklad 6

Derivační DC motoru, má tyto údaje odpor budícího vinutí $R_b = 40\Omega$, odpor kotvy $R = 0,09\Omega$. Budící proud má hodnotu $I_b = 2\text{ A}$, proud kotvou $I = 60\text{ A}$. Ztráty mechanické, v magnetickém obvodu a dodatečné při výpočtu zanedbejte.

Určete:

- a) Jak velké jsou výkonové ztráty v budícím vinutí?
- b) Jak velké jsou výkonové ztráty v kotevním vinutí?
- c) Jak velké jsou výkonové ztráty celkové ?

Příklad 7

Určete, jak velkou hodnotu bude mít proud, který dodával DC generátor při napětí $U = 120\text{ V}$ stále a rovnoměrně do spotřebiče po dobu 5 hodin byla-li odebraná elektrická energie ve výši $W_e = 36,5\text{ kWh}$.

Příklad 8

DC generátor má při do spotřebiče dodávaném napětí $U = 500\text{ V}$ a proudu $I = 300\text{ A}$, účinnost $\eta = 0,86$.

Určete jak velký je :

- a) elektrický výkon generátoru
- b) potřebný mechanický příkon pro tyto parametry.

Příklad 9

DC generátor má jmenovité napětí $U_N = 220 \text{ V}$, jmenovitý výkon $P_{2N} = 30 \text{ kW}$ a účinnost $\eta = 85\%$

Určete:

- a) jak velký musí být potřebný výkon poháněcího stroje?
- b) jak velké má generátor výkonové ztráty?
- c) kolik žárovek 220V/60W je možno k tomuto generátoru připojit paralelně, zanedbáme-li ztráty v přívodním vedení?
- d) jak velký proud dodává generátor při jmenovitém zatížení?

Materiály

Kocman

Stejnoseměrné stroje

Kocman

Elektrické stroje a přístroje I

Mravec

Elektrické stroje a přístroje I

Měřička

Elektrické stroje

Bartoš

Elektrické stroje

Pavelka

Elektrické pohony

Materiály ze stránek SPŠ Liberec (<https://www.pslib.cz/>)