

Elektrické pohony

Základní principy

Karel Zeman, Jiří Cibulka, 2017

Úvod

Předmět Elektrické pohony je přednášen v posledním semestru bakalářského studia. Studenti musí paralelně zvládat tyto úkoly:

- Zpracování bakalářské diplomové práce
- Příprava na bakalářskou státní zkoušku
- Příprava na zkoušky 6. semestru (velmi zkrácené zkušební období)

Pro studenty, kteří se ocitnou ve velké časové tísní je stanoveno následující kritérium „dobře“ složené zkoušky:

S využitím základních zákonů elektrotechniky, přednášek a znalostí z předchozích předmětů vysvětlit:

- Základní funkce a vlastnosti
 - Pohonů se stejnosměrnými motory
 - Pohonů s asynchronními motory
 - Pohonů se synchronními motory
 - Pohonů s bezkartáčovými stejnosměrnými motory

Pozn.: Při zkoušce bude oceňována zejména dokonalá znalost fyzikální podstaty regulace otáček jednotlivých pohonů v režimech pohon a brzdění.

- Základy dimenzování pohonů
- Podstata negativního působení jednotlivých pohonů na energetickou síť, základy kompenzace účinníku a vyšších harmonických proudů odebíraných ze sítě.

Předkládaný text „Elektrické pohony - základní principy“ má za úkol usnadnit studentům v časové tísní přípravu na zkoušku.

Text je nutno chápat jako výběr základních faktů a jevů, které je nutno dokonale pochopit. Pokud k tomu samotný text nestačí, je nutno využívat přednášky, další studijní literaturu a konzultace s pracovníky katedry.

Poznámky:

- *Pro zkoušku s výsledkem „dobře“ není nutno znát z paměti schémata uvedená v textu. Vysvětlovaný jev lze graficky popsat vlastním způsobem.*
- *Předkládaný text není „trojkové minimum“ (principy nazpaměť ≠ hodnocení 3, ale 4).*

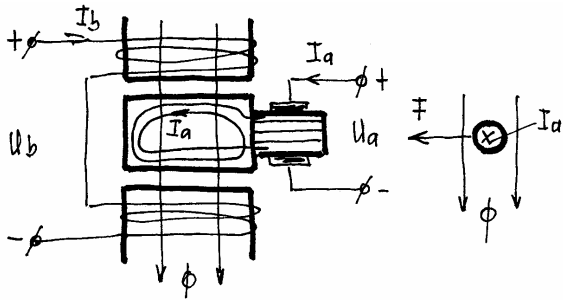
Karel Zeman, Jiří Cibulka

Obsah

1	POHONY SE STEJNOSMĚRNÝMI MOTORY.....	4
1.1	Princip ss motoru	4
1.2	Momentové charakteristiky	4
1.3	Regulace otáček	4
1.4	Brzdění ss motoru.....	5
1.5	Výkonové obvody ss pohonů	6
1.5.1	Střídavá síť.....	6
1.5.2	Stejnoseměrná trolej	7
1.6	Regulace otáček s podřazenou smyčkou proudu	8
2	POHONY S ASYNCHRONNÍM MOTOREM	9
2.1	Princip asynchronního motoru.....	9
2.2	Momentová charakteristika	10
2.3	Rozběh neregulovaného motoru	12
2.4	Jednofázový motor.....	12
2.5	Brzdění asynchronních motorů	13
2.6	Výkonové obvody asynchronních pohonů	14
2.6.1	Střídavá síť.....	14
2.6.2	Stejnoseměrná trolej	14
3	ŘÍZENÍ STŘÍDAČE	15
3.1	PWM modulace.....	15
3.2	Střídač v režimech pohon a brzdění.....	15
3.3	Regulační algoritmy	16
3.3.1	Skalární řízení	16
3.3.2	Vektorové řízení	18
3.3.3	Přímé řízení momentu.....	19
3.3.4	Pulsní usměrňovač.....	19
4	POHONY SE SYNCHRONNÍM MOTOREM	20
4.1	Princip synchronního motoru.....	20
4.2	Synchronní motor připojený přímo k energetické síti	20
4.2.1	Účinník	20
4.2.2	Rozběh.....	20
4.3	Výkonové obvody pohonů se synchronním motorem	21
4.4	Možnosti regulace synchronních motorů	21
4.4.1	? Skalární řízení ?	21
4.4.2	Princip vektorového řízení	22
4.4.3	Motory s permanentními magnety	22
5	BEZKARTÁČOVÝ STEJNOSMĚRNÝ MOTOR	23
5.1	Princip činnosti.....	23
5.2	Strukturní schéma pohonu	23
6	PŘEHLED DALŠÍCH DRUHŮ POHONŮ	24
6.1	Lineární motor.....	24
6.2	Reluktanční motor.....	24
7	DIMENZOVÁNÍ MĚNIČŮ A MOTORŮ	24
8	ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA	25
8.1	Průběh proudu odebíraného ze sítě	25
8.2	Kompenzace špatného účinníku	25
8.3	Kompenzace vyšších harmonických	25

1 Pohony se stejnosměrnými motory

1.1 Princip ss motoru

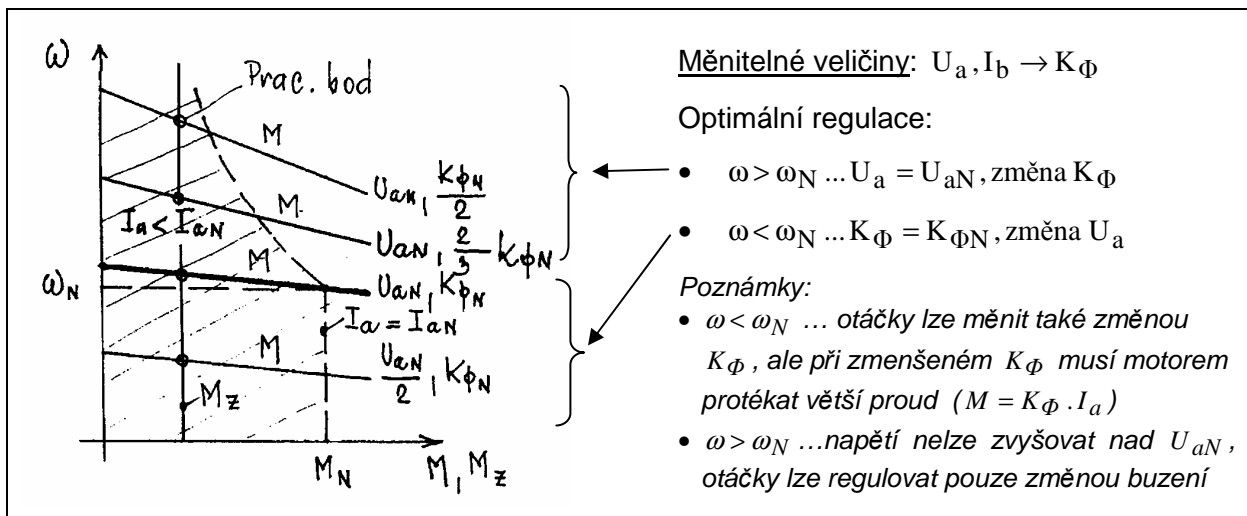


- Proudem I_b se vybudí magnetický tok Φ
 - Pokud vodičem ve vinutí rotoru (kotvy) protéká proud I_a , působí na něj síla F .
 - Tak vzniká moment na hřídeli motoru
- V následujících vztazích je využívána veličina K_Φ , úměrná magnetickému toku.

1.2 Momentové charakteristiky

<p>Napětí indukované do vinutí rotoru: $U_{ind} = K_\Phi \cdot \omega$ $K_\Phi = f(I_b)$, I_b ... budící proud, $[K_\Phi] = \text{Vs}$ Úhlová rychlost $\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$, n ... ot./min, $[\omega] = 1/\text{s}$</p>	
<p>Motor naprázdno ... $U_{ind} = U_a$ „Otáčky“ naprázdno: $\omega = \frac{U_a}{K_\Phi}$ Motor zatížen ... $U_{ind} = U_a - R_a \cdot I_a$ „Otáčky“ zatíženého motoru: $\omega = \frac{U_a}{K_\Phi} - \frac{R_a}{K_\Phi} \cdot I_a$</p>	
<p>Výkon: $P \cong U_{ind} \cdot I_a = K_\Phi \cdot \omega \cdot I_a$ Moment motoru: $M = \frac{P}{\omega} = K_\Phi \cdot I_a$, $\omega = \frac{U_a}{K_\Phi} - \frac{R_a}{K_\Phi^2} \cdot M$ M_z ... moment zátěže</p>	

1.3 Regulace otáček



Průběh momentu a výkonu při optimální regulaci motoru

Požadavek: Co nejrychlejší rozběh (maximální moment)

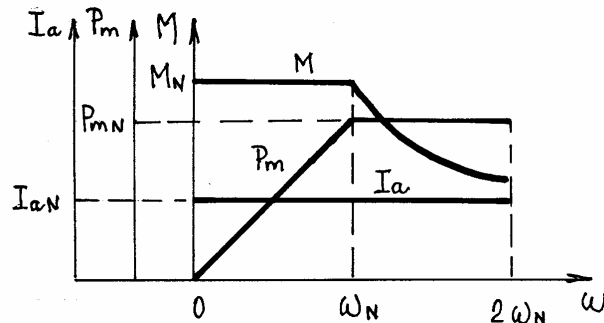
Během celého rozběhu jmenovitý proud kotvy motoru I_a

$$\omega < \omega_N$$

- $K_\Phi = K_{\Phi N}$, zvyšování napětí kotvy.
- $M = K_{\Phi N} \cdot I_{aN} = M_N = \text{konst}$
- $P_m = M_N \cdot \omega \dots$ lineární vzrůst

$$\omega > \omega_N$$

- $U_a \cong U_{aN}$, snižování K_Φ
- $P_m \cong U_{aN} \cdot I_{aN} = P_{mN} = \text{konst}$
- $M = P_{mN} / \omega$



$\omega < \omega_N \dots K_\Phi = \text{konst} = K_{\Phi N}$

- Motor může být plně nabuzen protože $U_{\text{ind}} = K_{\Phi N} \cdot \omega < U_{aN}$
- Proud se udržuje na konstantní hodnotě změnou napětí na svorkách kotvy.

$\omega > \omega_N \dots U_a = \text{konst} \cong U_{aN}$

- Motor se odbuzuje tak, aby indukované napětí $U_{\text{ind}} = K_\Phi \cdot \omega$ bylo při vzrůstajících otáčkách ω stále menší než napětí jmenovité (proud I_a pak zůstává konstantní)

Poznámka:

Optimální průběhy veličin u skutečného pohonu se zajišťují paralelní regulací otáček, proudu kotvy, napětí kotvy a budícího proudu ... viz EP_vytah_predn, kap. 2.5

1.4 Brzdění ss motoru

	Pohon	Brzdění
<p>Do odporu</p> <p>Motor se odpojí od usměrňovače, na svorky motoru se připojí brzdový odpor (motor při brzdění pracuje jako dynamo)</p> <p>-----</p> <p>Při brzdění je síť odpojena od motoru. Kinetická energie se maří v odporu</p>	<p>Zdroj Spotřebič</p> <p>$W_{\text{sít}} \rightarrow \text{motor}$</p>	<p>Zdroj Spotřebič</p> <p>$W_{\text{kin}} \rightarrow \text{odpor}$ $W_{\text{sít}} = 0$</p>
<p>Protiproudem</p> <p>Mezi usměrňovač a motor se připojí brzdový odpor a přepojí se svorky motoru.</p> <p>-----</p> <p>I při brzdění se odebírá ze sítě energie. Kinetická energie se maří v odporu</p>	<p>Zdroj Spotřebič</p> <p>$W_{\text{sít}} \rightarrow \text{motor}$</p>	<p>Zdroj Zdroj</p> <p>$W_{\text{kin}} \rightarrow \text{odpor}$ $W_{\text{sít}} \rightarrow \text{odpor}$</p>
<p>Rekuperací</p> <p>Na svorkách usměrňovače se sníží napětí. Tím se změni smysl proudu motoru.</p> <p>-----</p> <p>Při brzdění se kinetická energie motoru a zátěže dodává zpět do sítě</p>	<p>Zdroj Spotřebič</p> <p>$W_{\text{sít}} \rightarrow \text{motor}$</p>	<p>Spotřebič Zdroj</p> <p>$W_{\text{kin}} \rightarrow \text{sít}$</p>

1.5 Výkonové obvody ss pohonů

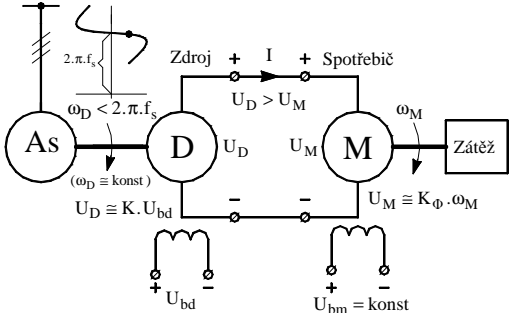
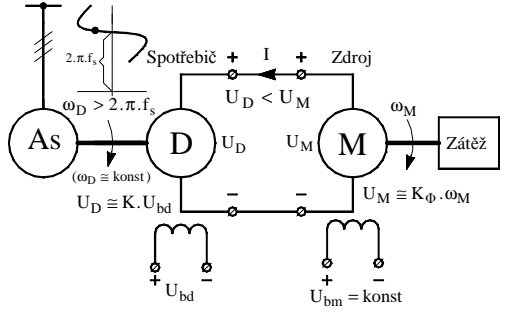
1.5.1 Střídavá síť

1.5.1.1 Ward Leopardovo soustrojí

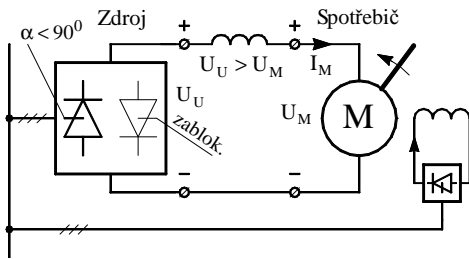
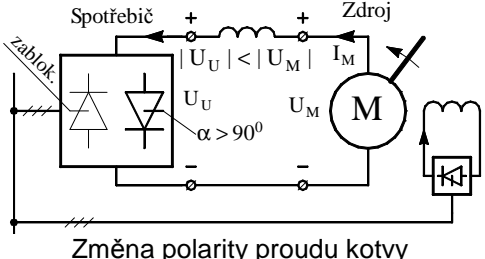
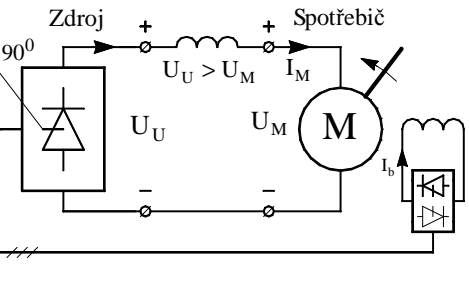
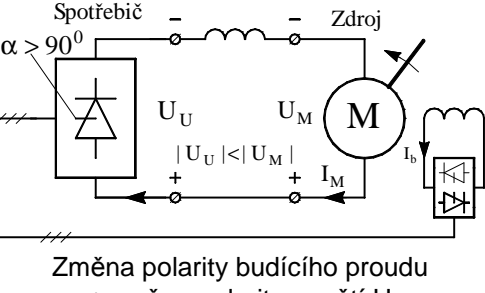
Princip činnosti:

- Asynchronní motor + dynamo ... zdroj stejnosměrného napětí
- Napětí dynama U_D lze měnit prostřednictvím budicího napětí U_{bd} ($\omega_D \cong \text{konst}$)
- V ustáleném stavu je $U_D \cong U_M \cong K_\Phi \cdot \omega_M$.

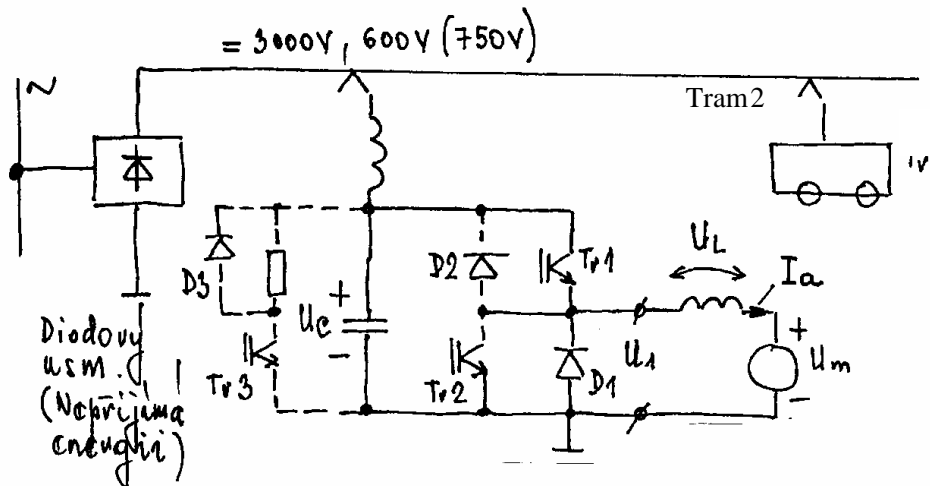
\Rightarrow V příp. $U_{bm} = \text{konst}$ ($K_\Phi = \text{konst}$) platí $\omega_M \approx U_{bd}$ (pokud dynamo pracuje v lineární části char.)

Pohon	Brzdění
 <ul style="list-style-type: none"> • Dynamo je nabuzeno tak, aby $U_D > U_M$ (v obvodu kotev jsou malé ohmické odpory $\Rightarrow U_D \cong U_M$) • Asynchronní motor zatěžovaný dynamem pracuje v motorickém režimu (odebírá ze sítě výkon) 	 <ul style="list-style-type: none"> • Dynamo je nabuzeno tak, aby $U_D < U_M$ • Obrátí se tok výkonu ... M pracuje jako dynamo, D pracuje jako motor • D roztáčí hřídel na otáčky vyšší než otáčky synchronní ... asynchronní motor pracuje v generátorickém režimu. • Kinetická energie zátěže a M je dodávána do sítě.

1.5.1.2 Pohon s polovodičovým usměrňovačem

Pohon	Brzdění
Reverzační měnič v obvodu kotvy	
	 <p style="text-align: center;">Změna polaroty proudu kotvy</p>
Reverzační měnič v obvodu buzení (levnější varianta)	
	 <p style="text-align: center;">Změna polaroty budicího proudu \Rightarrow změna polaroty napětí U_M</p>
Pozn.: Odpor tlumivky malý \Rightarrow v ustáleném stavu je střední hodnota napětí $U_U \cong U_M$	

1.5.2 Stejnosměrná trolej

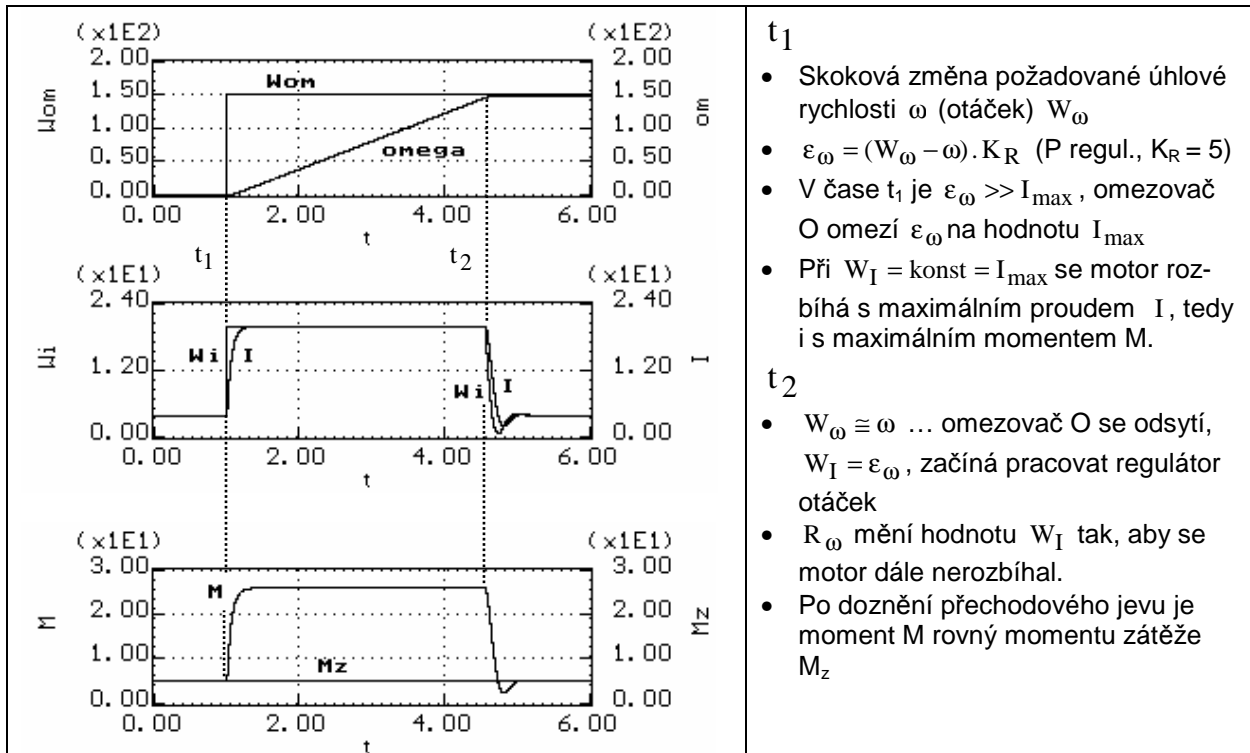
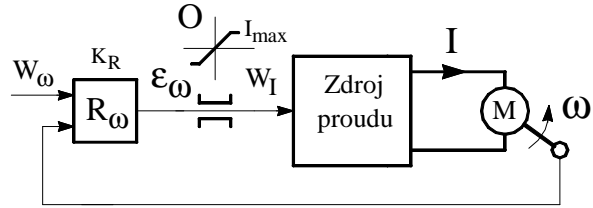


Jízda - $I_a > 0$	Brzdění - $I_a < 0$
<ul style="list-style-type: none"> Zap Tr1 ... $U_1 = U_c$ I_a roste Vyp Tr1 ... vodivá D1, $U_1 = 0$ I_a se zmenšuje 	<ul style="list-style-type: none"> Zap Tr2 ... energie motor \rightarrow tlumivka, $U_1 = 0$ Vyp Tr2 ... vodivá D2, nabíjí se kondenzátor <ul style="list-style-type: none"> - Tram2 jede ... odebírá brzdovou energii - Tram2 stojí ... kondenzátor nutno vybit (Tr3)

Průběh veličin při brzdění ... $U_c = 600\text{ V}, U_m = 200\text{ V}$	
Tr2...zap	Tr2...vyp
<p style="text-align: center;">„Zkrat“ přes tlumivku</p>	
$U_1 = 0$ $U_m = L \cdot \frac{dI_m}{dt}$ $\frac{dI_m}{dt} = \frac{200}{L}$	$U_1 = U_c$ $U_m - U_c = L \cdot \frac{dI_m}{dt}$ $\frac{dI_m}{dt} = -\frac{400}{L}$
<p>V okamžiku vypnutí Tr2 protéká indukčností L proud, proto sepne dioda D2 (pokud by nesehnula, vzniklo by na L nekonečné napětí)</p>	

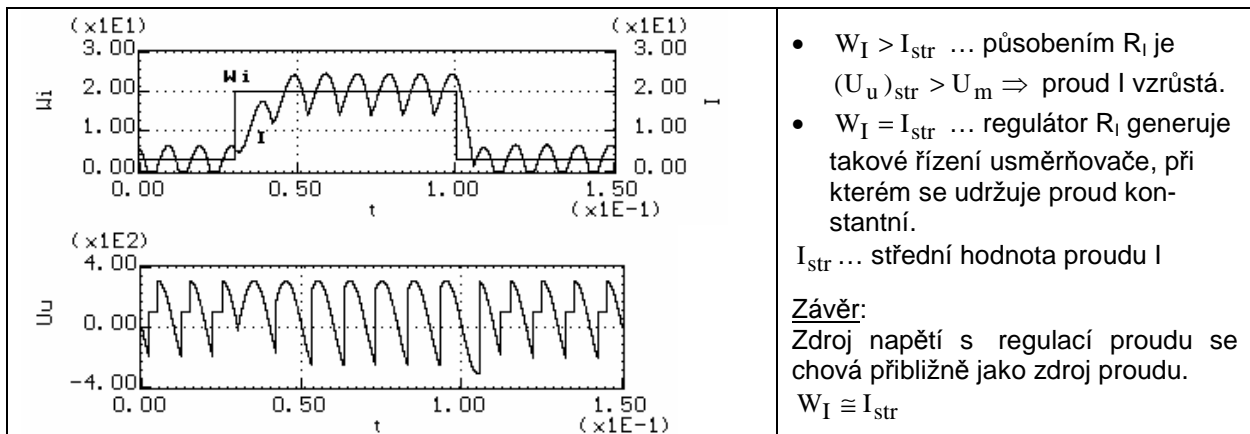
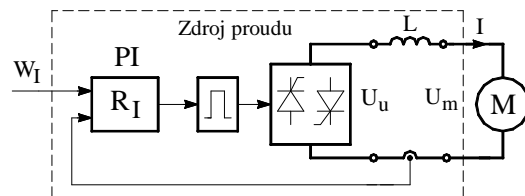
1.6 Regulace otáček s podřazenou smyčkou proudu

- Regulace otáček ss motoru napájeného zdrojem napětí je problematická ... při přechodových jevech mohou vznikat velké nadproudy.
- Omezení nadproudů se často realizuje náhradou zdroje napětí zdrojem proudu. Dokonalý zdroj proudu ($I = W_I$) je nerealizovatelný. Vlivem indukčností v obvodu kotvy motoru nemůže proud I přesně sledovat rychlé změny W_I .



Realizovatelný zdroj proudu

- Motor se napájí zdrojem napětí (např. tyristorový usměrňovač)
- Tento zdroj se řídí výstupním signálem regulátoru proudu



2 Pohony s asynchronním motorem

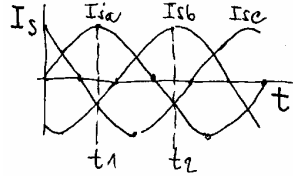
2.1 Princip asynchronního motoru

Stator ... 3 fázové vinutí vybudí rotující magnetické pole

Nutné podmínky vzniku točivého mg. pole:

1) Vícefázové proudy (časově posunuté)

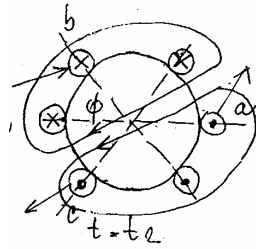
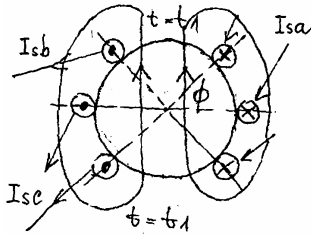
Pro názornost je vhodné uvažovat rozpojený rotor ... znázorněné proudy jsou pak proudy magnetizační



2) Vícefázové vinutí (prostorově rozložené)

$$t = t_1 : I_{sa} = I_{sm} \\ I_{sb} = I_{sc} = -I_{sm} / 2$$

$$t = t_2 : I_{sb} = I_{sm} \\ I_{sa} = I_{sc} = -I_{sm} / 2$$



Mg. tok se pootočil o 120°

Znázorněné točivé pole (2 pólový motor) rotuje úhlovou rychlostí $\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot f_s$, f_s ... kmitočet napájecího napětí

Synchronní úhlová rychlost

$$\omega_s [1/s] = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_s}{p_p}$$

Synchronní otáčky (ot. točivého pole)

$$n_s [\text{ot} / \text{min}] = \frac{f_s \cdot 60}{p_p}$$

p_p ... počet pólpárů

Otáčky rotoru ... $n_m [\text{ot} / \text{min}]$

Úhlová rychlost rotoru $\omega_m [1/s] = \frac{\pi \cdot n_m}{30}$

Přepočtené otáčky:

$$f_m [\text{ot} / \text{s}] = \frac{p_p \cdot \omega_m}{2\pi} = \frac{p_p \cdot n_m}{60}$$

Nezatížený 2 pólový motor ($p_p = 1$):

$$f_m [\text{ot} / \text{s}] \cong f_s [\text{Hz}]$$

Točivé pole indukuje do rotoru napětí o kmitočtu $f_r = s \cdot f_s$

$$\text{Skluz } s = \frac{n_s - n_m}{n_s} = \frac{f_s - f_m}{f_s} = \frac{f_r}{f_s}$$

Otáčky naprázdno ... $f_r = 0, s = 0$

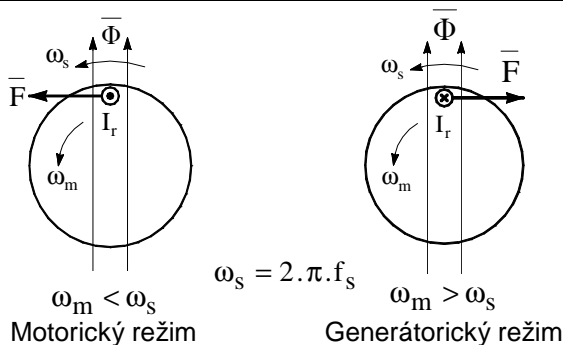
Jmenovité otáčky ... f_r např. 0.5 Hz

Zabrzděný motor pracuje jako transformátor nakrátko... $f_r = f_s, s = 1$

Rotor

- Klec nakrátko
- Vinutí vyvedené na kroužky

Motorický / generátorický chod



Motorický režim:

Φ rotuje rychleji než rotor \Rightarrow

- Do znázorněné tyče rotoru se indukuje napětí, které vyvolá proud I_r .
- Tento proud spolu s Φ vyvolají sílu F .

Generátorický režim:

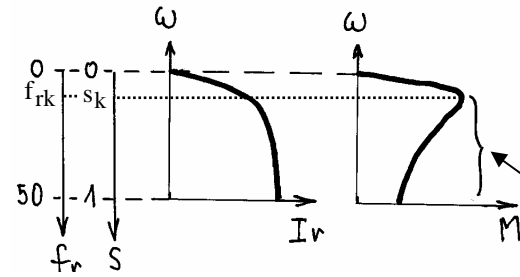
Φ rotuje pomaleji než rotor \Rightarrow

- Do znázorněné tyče rotoru se indukuje napětí opačné polarity.
- Proud I_r opačné polarity spolu se stejným Φ vyvolají obrácenou sílu F .

Generátorický režim se v pohonech využívá při brzdění rekuperací (při brzdění se postupně snižuje kmitočet střídače tak, aby $\omega_m > 2 \cdot \pi \cdot f_s$).

2.2 Momentová charakteristika

Tvar charakteristiky – fyzikální vysvětlení (dvoupólový motor):



ω ... úhlová rychlost rotoru
 ($\omega = 2 \cdot \pi \cdot n_m [\text{ot/s}]$)
 I_r ... proudu rotoru, M ... moment
 f_r ... kmitočet rotor. veličin
 $\omega_r = \omega_s - \omega = s \cdot \omega_s = 2 \cdot \pi \cdot f_r$
 $s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} = \frac{\omega_r}{\omega_s} = \frac{f_r}{f_s}$... skluz, $s_k = \frac{f_{rk}}{f_s} = \frac{\text{konst}}{f_s}$

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_s$... otáčky naprázdno

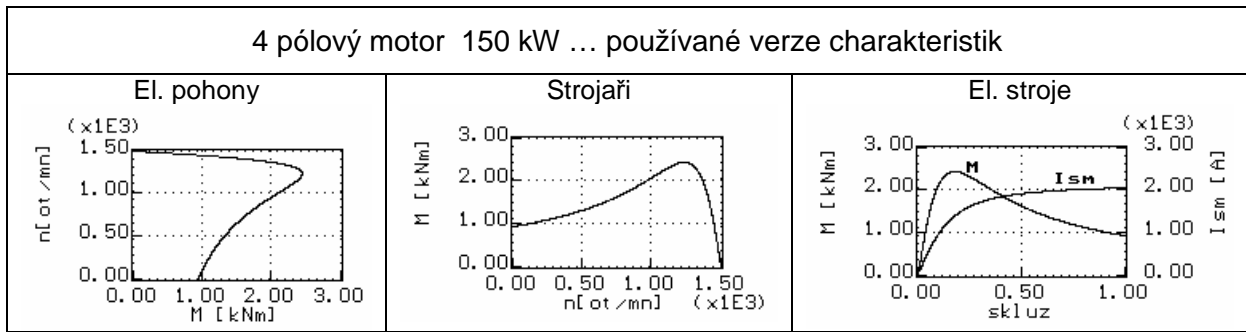
- Do rotoru se indukce nulové napětí, $M = 0$
- Rotorový kmitočet $f_r = 0$

Klesající otáčky (kmitočet f_s konstantní):

- Vzárost napětí induk. do rotoru $U_{\text{ind}} \cong \omega_r \cdot \Psi$
- Vzárost reaktance $X_r = \omega_r \cdot L_{r\sigma}$
- Proud rotoru $I_r = \frac{U_{\text{ind}}}{Z_r}$

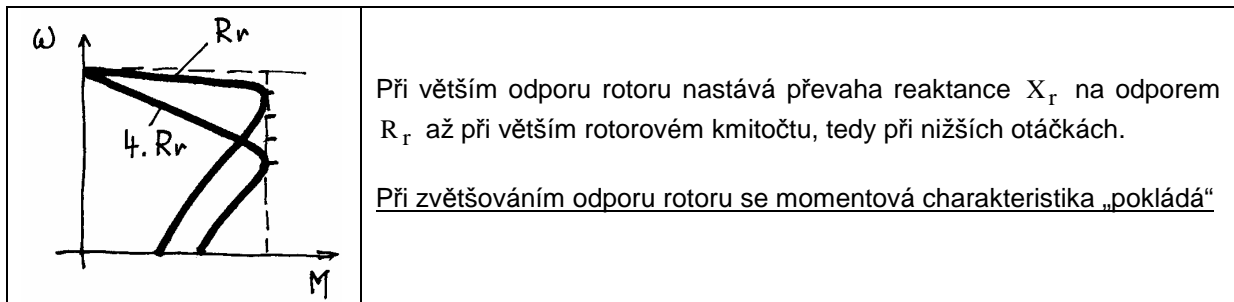
Pro $\omega_r \gg 0$ je $Z_r \cong X_r \Rightarrow I_r \cong \frac{U_{\text{ind}}}{X_r} \cong \text{konst}$

- S růstem skluzu roste fázový posun mezi indukovaným napětím a proudem.
- Při $f_r > f_{rk}$ vzrůstá fázový posun rychleji než indukované napětí \Rightarrow moment klesá.
 $f_{rk} = \text{konst}$, nezávislá na kmitočtu statoru f_s

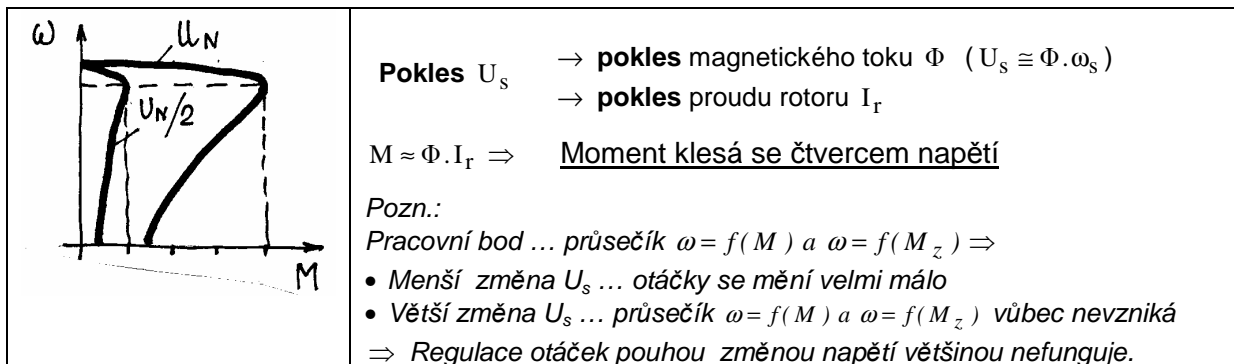


Vliv veličin motoru na tvar charakteristiky:

1) Rotorový odpor



2) Napětí statoru



3) Kmitočet

Kmitočet určuje otáčky naprázdno ... 2 pólový motor f_s [Hz] $\approx n_0$ [ot/sec]

V oblasti $f_s < f_{sN}$ (50 Hz) nelze měnit pouze kmitočet, je nutno současně měnit napětí.

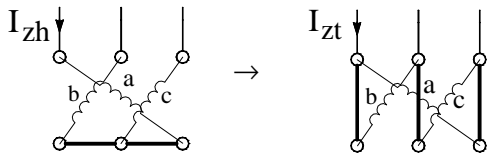
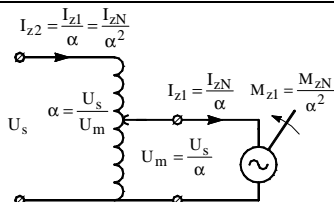
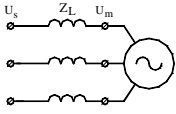
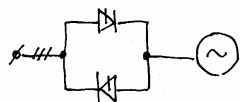
Příklad nesprávného řízení	
$f_s = 25$ Hz + jmenovité napětí: \Rightarrow dvojnásobný magnetický tok Ψ \Rightarrow velmi velký mg. proud (nelineární mg. charakteristika)	Důkaz: $U \cong U_{ind} = \omega_s \cdot \Psi = 2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot \Psi \Rightarrow \Psi_N = k \cdot \frac{U_N}{f_{sN}}$ $\frac{U_N}{f_{sN}/2} = 2 \cdot \Psi_N \cdot \frac{1}{k}$

4) Kmitočet + napětí statoru

Pokles U_s \rightarrow pokles magnetického toku Φ ($U_s \cong \Phi \cdot \omega_s$) \rightarrow pokles proudu I_r	$\Rightarrow M_k \approx \frac{U_s^2}{f_s^2}$
Pokles f_s \rightarrow vzrůst magnetického toku Φ ($U_s \cong \Phi \cdot \omega_s$, $\omega_s = 2\pi \cdot f_s$) \rightarrow Při nezměněné relativní rychlosti točivého pole a rotoru ($f_{rk} = konst$) vzrůst napětí indukovaného do rotoru \rightarrow vzrůst proudu I_r	
<p>2 polový motor</p> <p>Úhlová rychlost naprázdno $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_s$ / počet pólpárů</p> <p>$\omega > \omega_N \dots U_s = konst = U_{sN}$</p> <ul style="list-style-type: none"> • Při vzrůstu f_s klesá magnetický tok ($U_{sN} \cong \Phi \cdot \omega_s$, $\omega_s = 2\pi \cdot f_s$) • Při nezměněné relativní rychlosti točivého pole a rotoru pokles indukovaného napětí - pokles proudu I_r <p>\Rightarrow Moment $M_k \approx \frac{K}{f_s^2}$ ($M \approx \Phi \cdot I_r$)</p> <p>$\omega \leq \omega_N \dots \frac{U_s}{f_s} = konst = \frac{U_{sN}}{50}$</p> <p>(Tuto podmínku musí zajistit řídicí obvody pohonu)</p> <ul style="list-style-type: none"> • $\frac{U_s}{f_s} = konst = \frac{U_{sN}}{50} \Rightarrow \Phi = konst$ • $\frac{U_s}{f_s} = konst \Rightarrow \frac{U_s^2}{f_s^2} = konst \Rightarrow M_k = konst$ <p>$M_k \dots$ maximální (kritický) moment</p> <p>! $f_s = 25$ Hz, $U_s = U_{sN} \Rightarrow \Phi = 2 \cdot \Phi_N$ Nelineární mg. charakteristika ... $I_\mu \gg \gg \gg I_{\mu N}$</p>	

4 pólový motor 150 kW		
$f_s = 50$ Hz, $U_s = U_{sN}$	$f_s = 25$ Hz, $U_s = U_{sN} / 2$	$f_s = 100$ Hz, $U_s = U_{sN}$
$M_k = M_{k_50}$ $I_{max} = I_{max_50}$	$M_{k_25} \cong M_{k_50}$ $I_{max_25} \cong I_{max_50}$	$M_{k_100} = M_{k_50} / 4$ $I_{max_100} = I_{max_50} / 2$

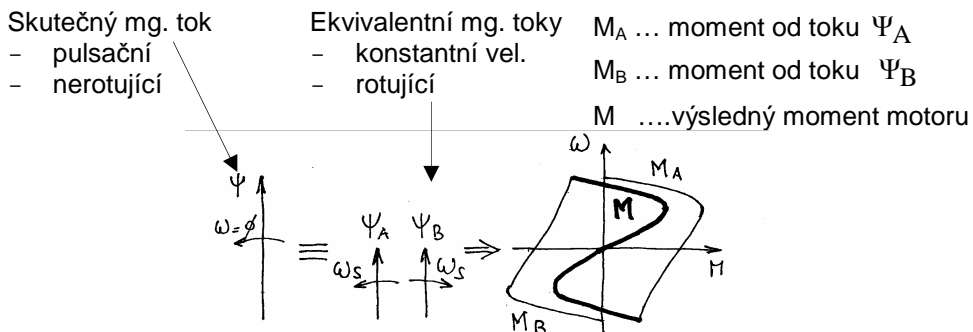
2.3 Rozběh neregulovaného motoru

1) Malý výkon ... přímé připojení k síti	
2) Hvězda – trojúhelník	 <ul style="list-style-type: none"> • Záběrný proud $\frac{I_{zh}}{I_{zt}} = \frac{1}{3}$ • Záběrný moment $\frac{M_{zh}}{M_{zt}} = \frac{1}{3}$ <p>Vinutí do hvězdy: Proud ze sítě ... $I_{zh} = I_a$, vinutí připojeno na fázové napětí Vinutí do trojúhelníka: Proud ze sítě ... $I_{zt} = I_a - I_b$, vinutí připojeno na sdružené napětí</p>
3) Spouštěcí trafo	 <ul style="list-style-type: none"> • Záběrný proud I_{z2} klesá <u>se čtvercem</u> α • Záběrný moment klesá také <u>se čtvercem</u> α
4) Tlumivky	 <ul style="list-style-type: none"> • Záběrný proud klesá <u>lineárně</u> s poklesem svorkového napětí • Záběrný moment klesá <u>se čtvercem</u> svorkového napětí
5) Soft start	

2.4 Jednofázový motor

Bez pomocné (rozběhové) fáze

Jednofázové vinutí vytváří pulsační (nerotující) magnetický tok.

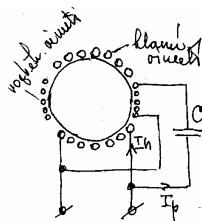


Závěry:

- Při nulových otáčkách nulový moment (motor se sám nerozběhne)
- Ruční pootočení ... rozběh možný oběma směry

S pomocnou (rozběhovou fází)

Točivé pole se vytváří působením rozběhového vinutí.

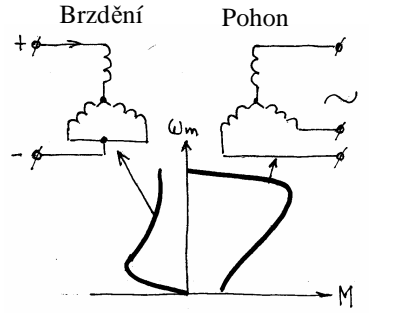


Podmínky vzniku točivého pole:

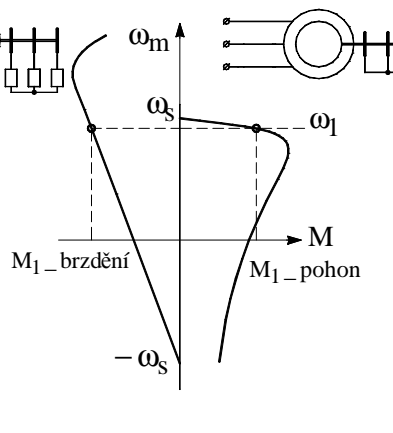
- 1) Prostorové vzájemné pootočení vinutí (viz schéma)
- 2) Fázově posunutý proud
Proud I_p je působením kondenzátoru C fázově posunut vůči proudu I_h .

2.5 Brzdění asynchronních motorů

a) Dynamické ... stator napájen ss proudem

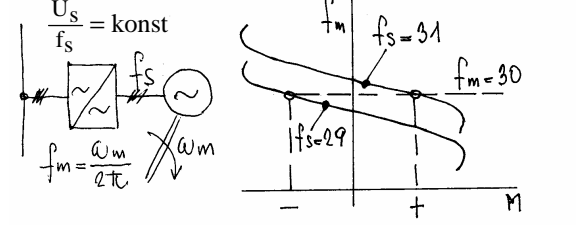
<p>Brzdění:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vinutí statoru připojeno na ss napětí. • Vzniká stojité mg. pole • Do vinutí rotujícího rotoru se indukují napětí, rotorovým vinutím protéká proud • Proud rotoru s mg. tokem vytváří záporný moment. 		<p>Pohon:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vinutí statoru připojeno na 3f střídavé napětí • Vzniká točivé pole, rotující synchronní rychlostí • Pokud rotor rotuje pomaleji, indukují se do vinutí rotoru napětí, rotorovým vinutím protéká proud. • Proud rotoru s mg. tokem vytváří kladný moment.
<p>Tok energie při brzdění : Kinetická energie se maří v odporech rotoru</p>		

b) Protiproudem

<p>Brzdění:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sled fází ... a, c, b <ul style="list-style-type: none"> - Točivé pole rotuje obráceně - Synchronní rychlost záporná • Do rotoru jsou zapojené brzdné odpory <ul style="list-style-type: none"> - Momentová charakteristika se „položí“ - Omezí se proudy statoru i rotoru • Při nulových otáčkách nutno motor odpojit od sítě 		<p>Pohon:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sled fází statoru ... a, b, c • Rotor nakrátko <p>Ze sítě se odebírá energie</p>
<p>Tok energie při brzdění:</p> <ul style="list-style-type: none"> • I při brzdění se odebírá energie ze sítě (brzdění ≈ rozběh do záporných otáček) • Kinetická energie se maří v odporech rotoru 		

Poznámka: Teoreticky lze brzdit protiproudem i motor nakrátko. Po „přehození“ fází však motorem protéká velmi velký proud (po přehození fází je skluz $s \approx 2$)

c) Rekuperace

	<p>$f_m = 30 \text{ ot/s}$... zvolený příklad (2 pólový motor)</p> <p>Pohon: $f_s = 31 \text{ Hz}$. ... mg. pole rotuje rychleji než rotor</p> <p>Brzdění : $f_s = 29 \text{ Hz}$. ... mg. pole rotuje pomaleji než rotor, motor pracuje jako generátor</p>
<p>Tok energie při brzdění: Kinetická energie prochází motorem (při brzdění pracuje jako asynchronní generátor) a polovodičovým měničem zpět do sítě.</p>	

Poznámky (2 pólový motor)

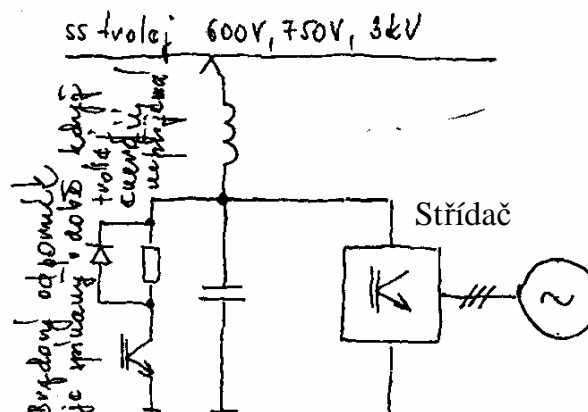
<p>Asynchronní generátor (připojený k síti) + turbína</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Synchronní otáčky ... $f_{ms} = 50 \text{ ot/sec} = \text{konst}$ • Působením turbíny ... $f_m > f_{ms}$
<p>Regulovaný pohon s asynchronním motorem při rekuperativním brzdění</p>	<ul style="list-style-type: none"> • f_m ... okamžité otáčky motoru • Synchronní otáčky určené střídačem $f_{ms} < f_m$

2.6 Výkonové obvody asynchronních pohonů

2.6.1 Střídavá síť

<p>Diodový usměrň. Brzdění $W_{kin} \rightarrow R_b$ Střídač</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Levná varianta. • Při brzdění se kinetická energie maří v odporu. • Ze sítě se odebírá (režim pohon) nesinusový proud
<p>Reverzní usm. Pohon: $\alpha_1 \rightarrow \phi$, α_2 blok. Brzdění: α_1 blok., $\alpha_2 \rightarrow 180^\circ$ Energie se vrací do sítě</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Při brzdění se kinetická energie dodává do sítě. • Nesinusový proud sítě při režimu pohon i brzdění.
<p>Pulsní usm. Střídač</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Drahá varianta • Výborné vlastnosti v režimu pohon i brzdění

2.6.2 Stejnoseměrná trolej



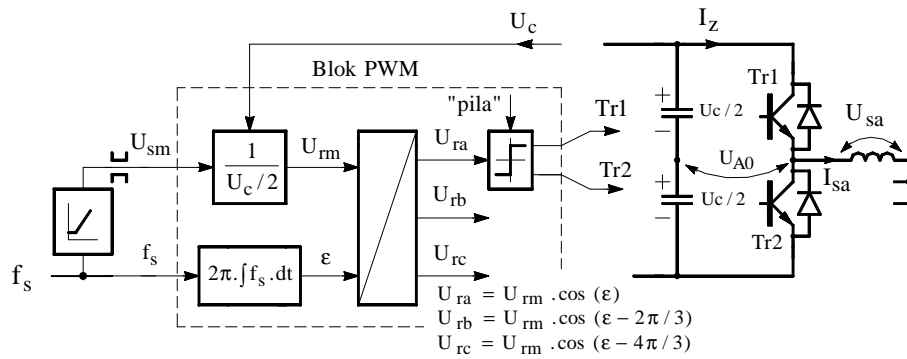
Další varianty pro trolej 3 kV:

(Tranzistory střídače na menší napětí)

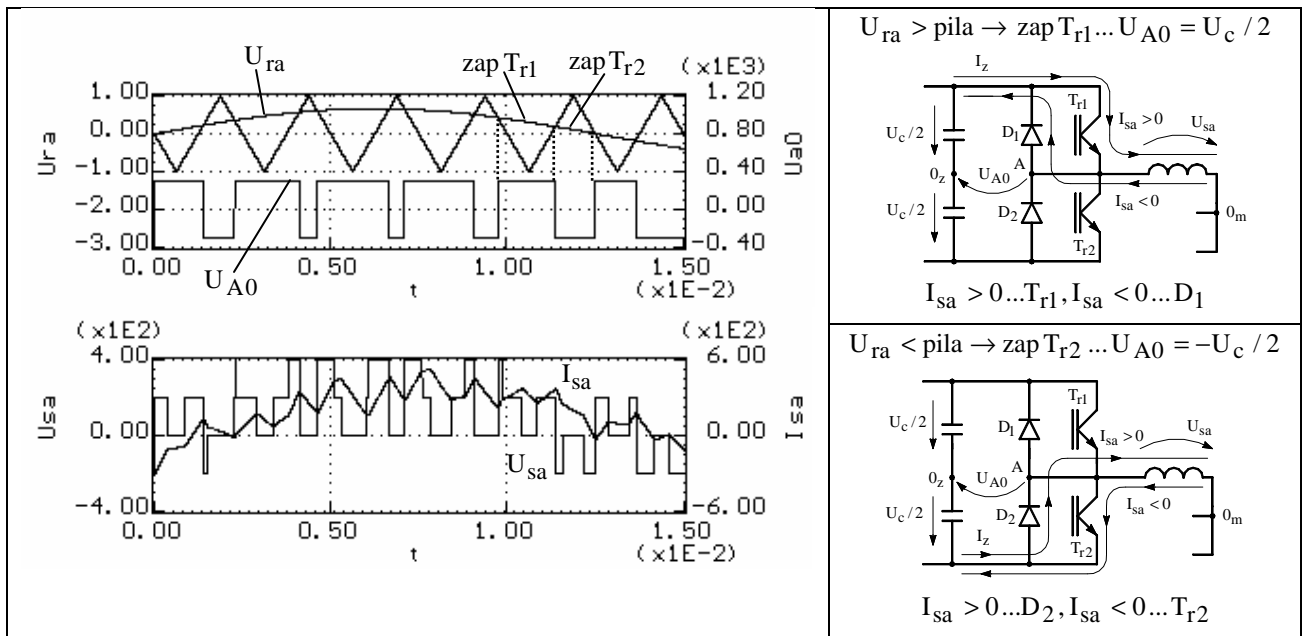
- Před střídačem pulsní měnič .
- 2 kondenzátory, 2 střídače v sérii, motor 2 paralelní vinutí.

3 Řízení střídače

3.1 PWM modulace

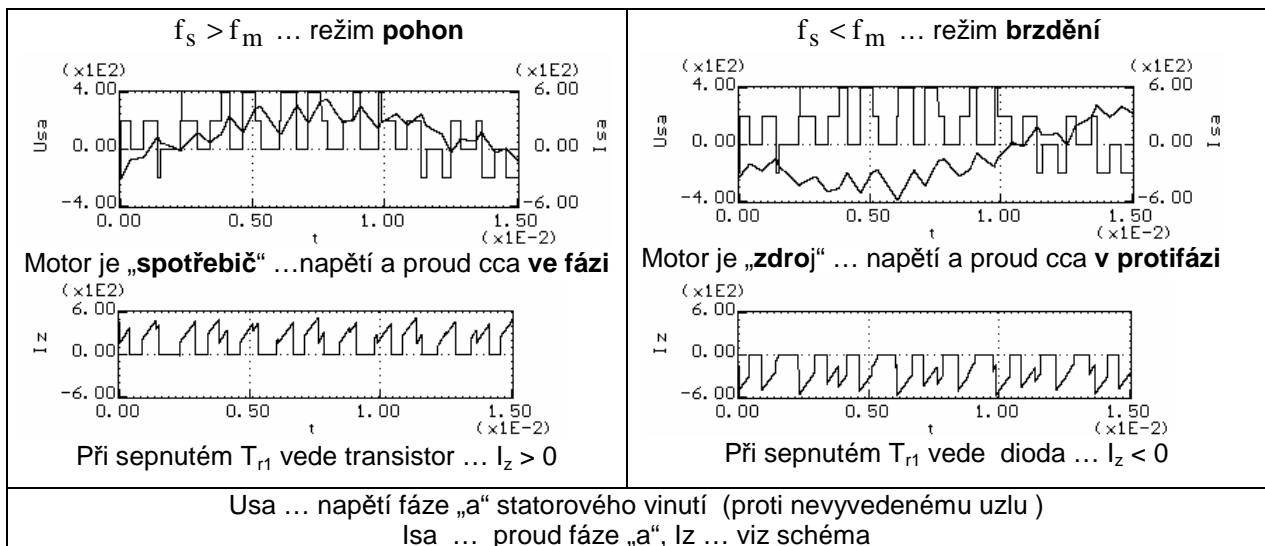


Pozn.: Ve skutečnosti je zapojen pouze 1 kondenzátor. Pokud chceme osciloskopem změřit napětí U_{A0} , je nutno zapojit kondenzátory 2.



3.2 Střídač v režimech pohon a brzdění

Pozn.: Následující text s grafy není vhodné se „naučit“, ale je účelné se zamyslet, proč se při zcela stejném napětí střídače U_{sa} mění při změně pracovního režimu proudy I_{sa} , I_z .



3.3 Regulační algoritmy

3.3.1 Skalární řízení

Pro jednoduchost uvažujme 2 pólový motor.

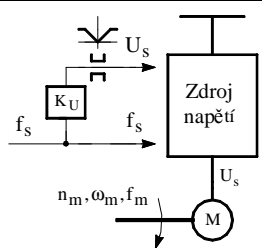
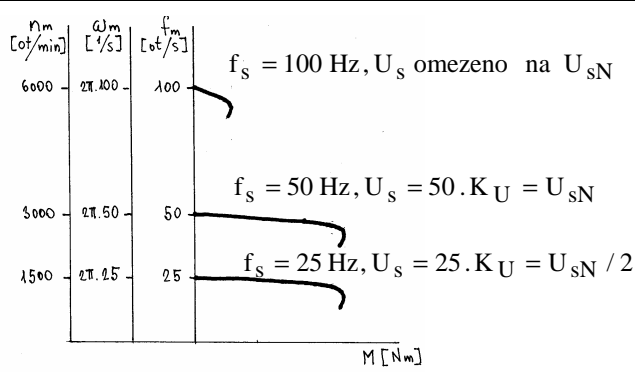
Točivé pole Φ rotuje úhlovou synchronní rychlostí $\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot f_s$.

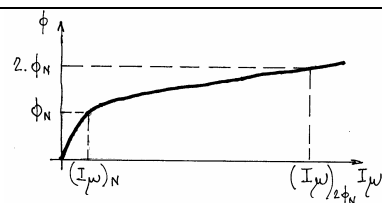
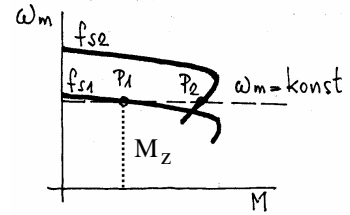
- Otáčky točivého pole f_{ms} [ot/sec] $\approx f_s$ [Hz]
 - Otáčky motoru naprázdno $f_{m0} \cong f_{ms}$
 - V lineární části momentové charakteristiky se otáčky příliš nemění.
- } \Rightarrow **Otáčky asynchronního motoru určuje kmitočet střídače.**
 f_m [ot/s] $\approx f_s$ [Hz]

Napětí indukované do statorového vinutí (N závitů) : $U_{ind} = N \cdot \Phi \cdot \omega_s = \Psi \cdot \omega_s$
 $[U_{ind}] = V, [\Psi] = Vs, [\omega_s] = 1/s$

Magnetický tok $\Psi = \frac{U_{ind}}{\omega_s} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{U_{ind}}{f_s}$, mimo oblast velmi malých otáček $U_{ind} \cong U_s$

Základní algoritmus skalárního řízení: $\Psi = \Psi_N \dots \frac{U_s}{f_s} = konst = \frac{U_{sN}}{50} = K_U$

2 pólový motor (p_p = 1)	
 <p>Úhlová rychlost : ω_m [1/s] Otáčky: n_m [ot/min] Přepočtené otáčky: f_m [ot/s] = $\frac{n_m}{60} \cdot p_p = \frac{\omega_m}{2\pi} \cdot p_p$</p>	 <p style="text-align: center;">Motory s malými ztrátami ... pracovní otáčky $f_m \cong f_s$</p>
Pracovní oblast pohonu: <ul style="list-style-type: none"> • $f_s < 50 \text{ Hz}$ - $M_{max} = konst (M_N)$ • $f_s > 50 \text{ Hz}$ - $P_{max} = konst (P_N)$... vysvětlení uvedeno u trakčních pohonů se skalárním řízením 	

Problémové jevy	
$U_s \neq f_s \cdot K_U$	<ul style="list-style-type: none"> • $f_s = 25 \text{ Hz}, U_s = U_{sN}$ $\Rightarrow \Phi = 2 \cdot \Phi_N$ • Velmi velký magnetizační proud I_μ 
<u>Rychlá změna kmitočtu</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Konstantní otáčky, změna kmitočtu $f_{s1} \rightarrow f_{s2}$ • Pracovní bod $P_1 \rightarrow P_2$ V prac. bodě P_2 protéká motorem velký proud  <p style="text-align: center;">Začátek přech. jevu ... ještě nedošlo ke zvýšení otáček</p>

Pohon se skalárním řízením bez čidla otáček

RP - „rozběhová rampa“ zpomaluje změny f_s po rychlých změnách f_{sw} (motor musí stále pracovat v lineární části charakteristiky)

Blok K - $f_s > 0 \dots U_{sm} = f_s \cdot (U_{sN} / 50)$
 $f_s \rightarrow 0 \dots U_{sm} = f_s \cdot (U_{sN} / 50) + \Delta U$
 $\Delta U \dots$ kompenzace úbytků napětí na odporech
 $f_s > 50 \text{ Hz} \dots U_{sm}$ se omezuje na jmen. hodnotu

- Vstupní veličina f_{sw} zadává ustálené otáčky naprázdno (motory s malými ztrátami ... při zátěži nastává malý pokles otáček)
- Blok RP je nutno navrhnout tak, aby po změně f_{sw} vzrůstalo f_s dostatečně pomalu. (Motor musí stále pracovat v lineární části charakteristiky $\Rightarrow f_s \cong f_m, f_m = p_p \cdot \omega_m / 2\pi$)

Trakční pohon se skalárním řízením

$\omega_m \dots$ úhlová rychlost hřídele
 $p_p \dots$ počet pólů
 $f_m \dots$ přepočtené otáčky, $f_m = p_p \cdot \omega_m / 2\pi$
 $p_p = 1 \dots f_m = \text{otáčky} / \text{sec}$
 $f_r \dots$ signál zadávaný řidičem (kmitočet rotoru)
 $f_s \dots$ kmitočet střídače
 $U_{sm} \dots$ amplituda napětí

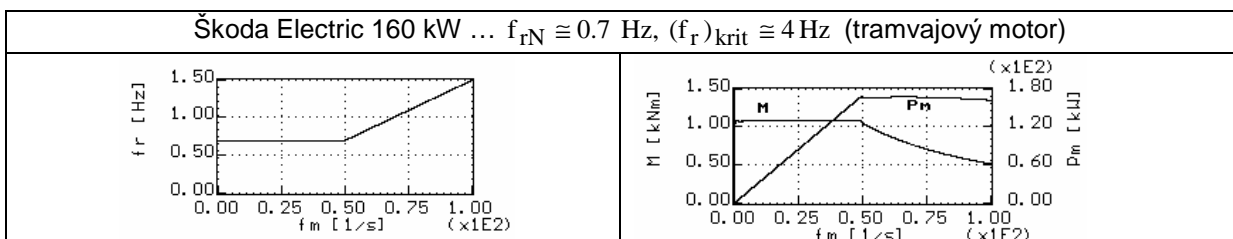
- Řidič tramvaje zadává požadovaný moment (obdobně jako pedál „plynu“ v autě).
- U asynchronního motoru lze moment zadávat prostřednictvím rotorového kmitočtu f_r

- K přepočteným změněným otáčkám f_m se připočítává signál f_r zadávaný řidičem. Výsledek f_s určuje kmitočet střídače.

Poznámky k trakčnímu pohonu:

- Trakční pohony se většinou provozují také v oblasti vysokých otáček. Aby indukované napětí příliš nevzrůstalo musí se motor odbudit. Odbuzení probíhá automaticky prostřednictvím omezovače U_{sm} .
- Při konstantním zadávaném rotorovém kmitočtu v oblasti vysokých otáček klesá moment M (se čtvercem otáček) i klesá výkon $P_m = M \cdot \omega_m$ (lineárně se vzrůstem otáček).
- Při vhodném zvyšování zadávaného rotorového kmitočtu může motor v oblasti vysokých otáček dodávat konstantní výkon.

Vysvětlení: Při zvyšování satorového kmitočtu klesá magnetický tok, při nezměněném rotorovém kmitočtu klesá napětí indukované do rotoru \Rightarrow pokles proudu rotoru. Konstantního proudu rotoru lze dosáhnout zvyšováním rotorového kmitočtu (stále však musí být menší než kmitočet příslušný momentu zvratu f_{rk}). Tak lze dosáhnout $I_{sm} = \text{konst}$, tedy i $P_m \cong \text{konst}$.

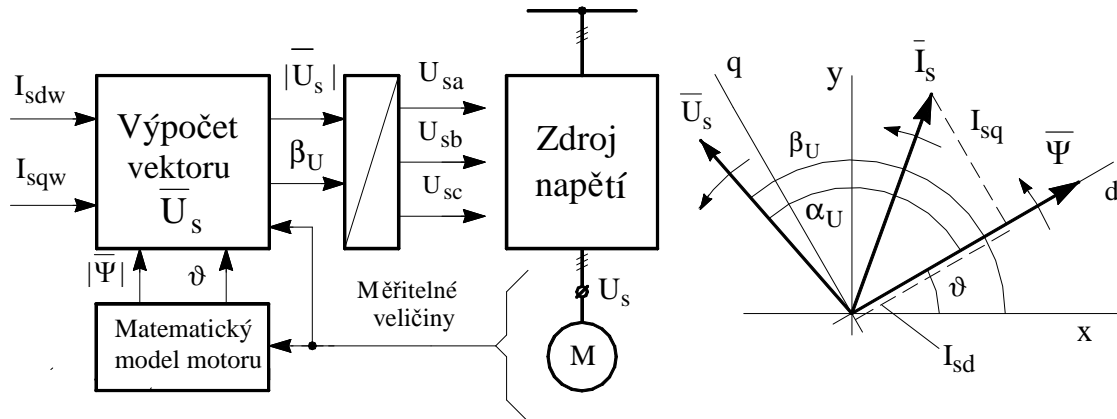


3.3.2 Vektorové řízení

Skalární řízení vyhodnocuje pouze **velikost** vhodného svorkového **napětí** motoru.

Vektorové řízení vyhodnocuje vhodnou **velikost** i vhodnou **polohu** vektoru svorkového **napětí** („prostorový“ vektor střídavé 3_fázové veličiny není v základním kursu dokonale definován ... v ustálených stavech lze s ním pracovat podobně jako s fázorem).

Pohon s vektorovým řízením má výborné dynamické vlastnosti.



$\bar{\Psi}$... rotující magnetický tok

\bar{U}_s ... svorkové napětí, při kterém motorem protéká zadaný proud
 $\bar{I}_s = \bar{I}_{sw}$

\bar{I}_s ... proud ve statorovém vinutí

I_{sd} ... složka proudu která budí magnetický tok
 (obdoba budícího proudu ss motoru)

I_{sq} ... složka proudu který vytváří moment
 (obdoba proudu kotvy ss motoru)

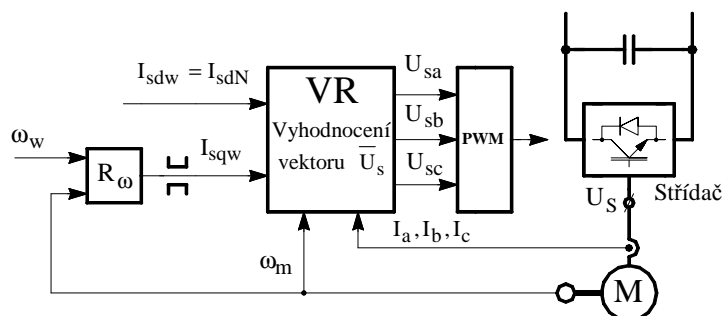
x, y ... souřadný systém statoru

d, q ... souřadný systém rotující s mg. tokem

Matematický model motoru ... soustava diferenciálních rovnic, řešených v „reálném čase“

Pohon s vektorovým řízením

(Pro jednoduchost $\omega_w < \omega_{mN} \Rightarrow$ motor se nemusí odbuzovat ... $I_{sdw} = I_{sdN}$)



Pozn.: Pohon s vektorově řízeným asynchronním motorem má obdobné vlastnosti jako pohon stejnosměrný.

Blok VR

Generuje vhodná fázová napětí U_{sa} , U_{sb} , U_{sc} tak, aby platilo:

- $I_{sdw} = I_{sd}$
- $I_{sdw} = \text{konst} \dots$ konst. mg. tok
- $I_{sqw} = I_{sq} \dots I_{sq} \approx$ momentu M

PWM – pulsně šířková modulace (vyhod. spínané tranzistory)

Regulace otáček

- $\omega_m < \omega_w \dots$ omezovač nasycen, $I_{sqw} = \text{max} \Rightarrow$ rozběh s maxim. momentem
- $\omega_m \cong \omega_w \dots$ omez. nefunkční, $I_{sqw} \approx$ zatěž. momentu M_z

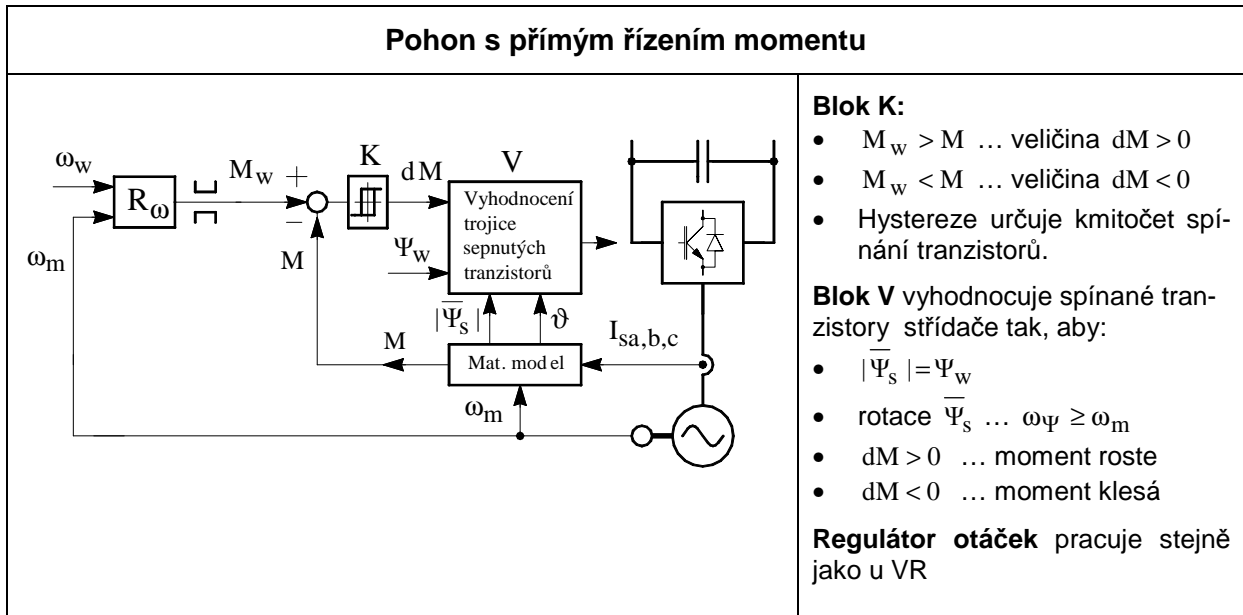
3.3.3 Přímé řízení momentu

Algoritmy vektorového řízení (předchozí kapitola):

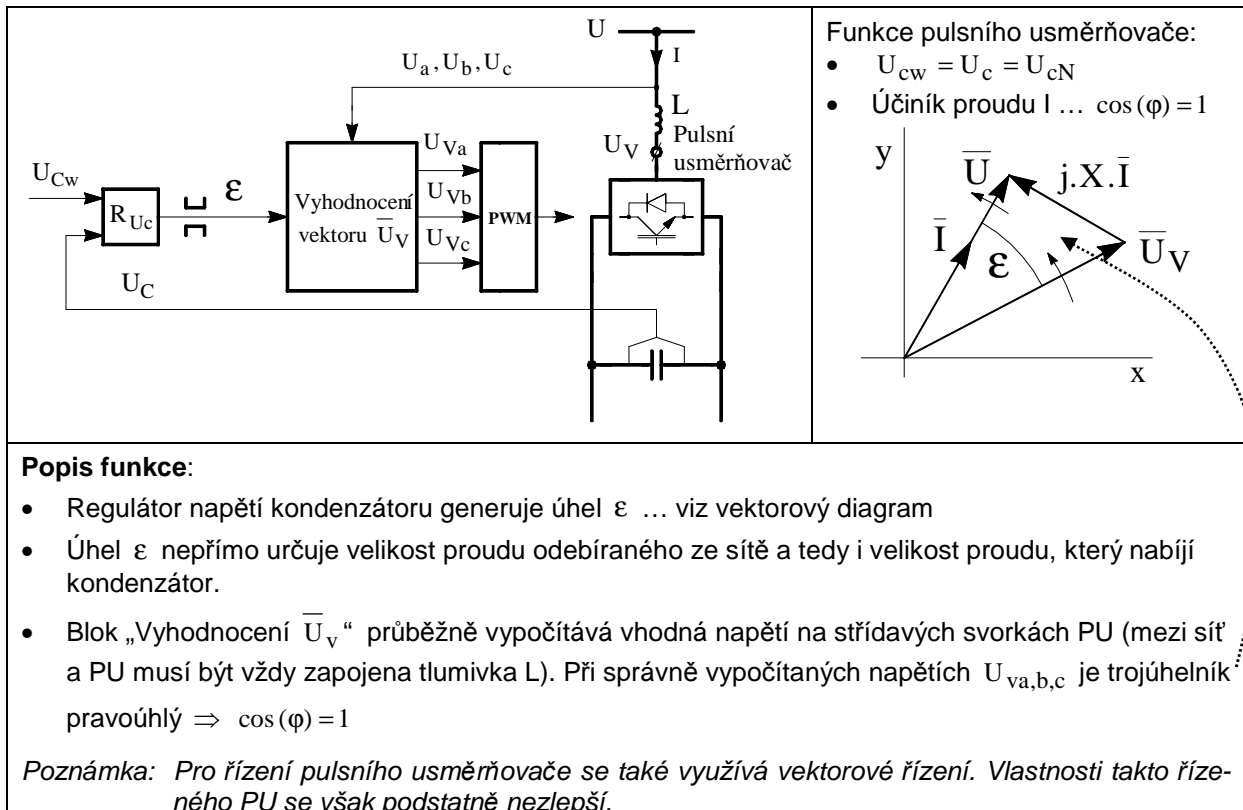
- Vyhodnocují vhodný vektor svorkového napětí (tzn. vhodné průběhy fázových napětí).
- Od těchto průběhů je odvozeno spínání tranzistorů střídače (pulsně šířková modulace ... PWM)

Algoritmy „přímého řízení“ momentu:

- Přímo vyhodnocují vhodné sepnuté tranzistory střídače prostřednictvím
 - Dvuhodnotové regulace momentu
 - Požadavku na rotaci mg. pole $\omega_{\Psi} \geq \omega_m$

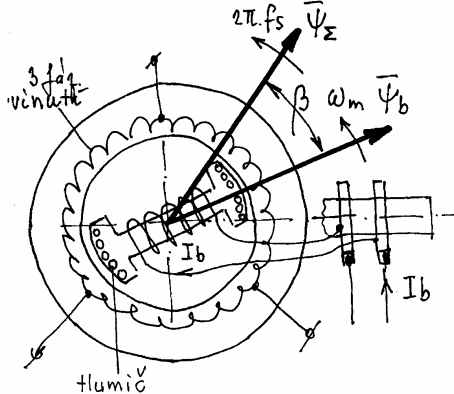


3.3.4 Pulsní usměrňovač



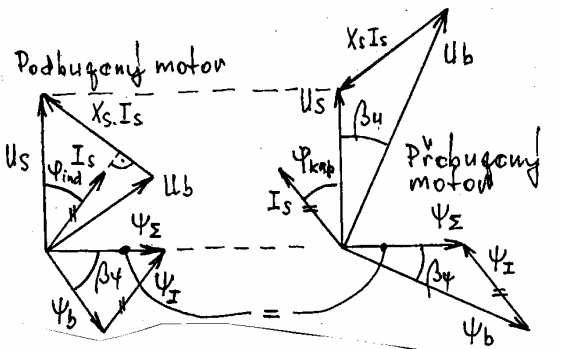
4 Pohony se synchronním motorem

4.1 Princip synchronního motoru

 <ul style="list-style-type: none"> • Chod naprázdno ... $\beta = 0$ • Motorický režim ... $0 < \beta < 90^\circ$ • Brzdění rekuperací ... β záporné 	<p>Stator</p> <ul style="list-style-type: none"> • 3 fázové vinutí → „točivé pole“ $\bar{\Psi}_\Sigma$ <p>Rotor</p> <ul style="list-style-type: none"> • Budící vinutí nebo permanentní magnety → $\bar{\Psi}_b$ • Tlumič obdoba kotvy asynchronního motoru $\omega_m = \omega_s = 2\pi \cdot f_s$... do tlumiče se neindukuje napětí $\omega_m \neq \omega_s$... tlumič pracuje jako kotva as. motoru <p>Točivý moment ... silové působení toků $\bar{\Psi}_\Sigma$, $\bar{\Psi}_b$ β ... zátěžný úhel</p> <p>Moment motoru ... $M = M_m \cdot \sin(\beta)$ (Důkaz vztahu lze nahradit fyzikální úvahou)</p> <p>„Vypadnutí ze synchronizmu“ ... $\beta > 90^\circ$ Poruchový režim ... velké proudy apod.</p>
---	---

4.2 Synchronní motor připojený přímo k energetické síti

4.2.1 Účinník

	<p>Ψ_b ... tok vybuzený budícím vinutím</p> <p>Ψ_I ... tok vybuzený statorovým proudem</p> <p>Ψ_Σ ... výsledný tok</p> <p>U_s ... napětí sítě $\bar{U}_s \cong j \cdot \omega_s \cdot \bar{\Psi}_\Sigma$</p> <p>$U_b$... napětí <u>indukované</u> tokem $\bar{\Psi}_b$ <u>do statorového</u> vinutí ... $\bar{U}_b = j \cdot \omega_s \cdot \bar{\Psi}_b$</p> <p>$\beta_\Psi$... zátěžný úhel $\cong \beta_U$</p> <p>! Podbuzený motor ... ϕ induktivní Přebuzený motor ... ϕ kapacitní</p>
---	--

4.2.2 Rozběh

K rozběhu je využíván tlumič, který pracuje jako kotva asynchronního motoru. Stejně jako u asynchronního motoru s kotvou nakrátko je nutno **omezovat proud** statoru.

Způsoby omezování proudu : 1) Hvězda – trojúhelník, 2) Tlumivky v sérii se statorovým vinutím, 3) Spouštěcí trafo, 4) Soft – start.

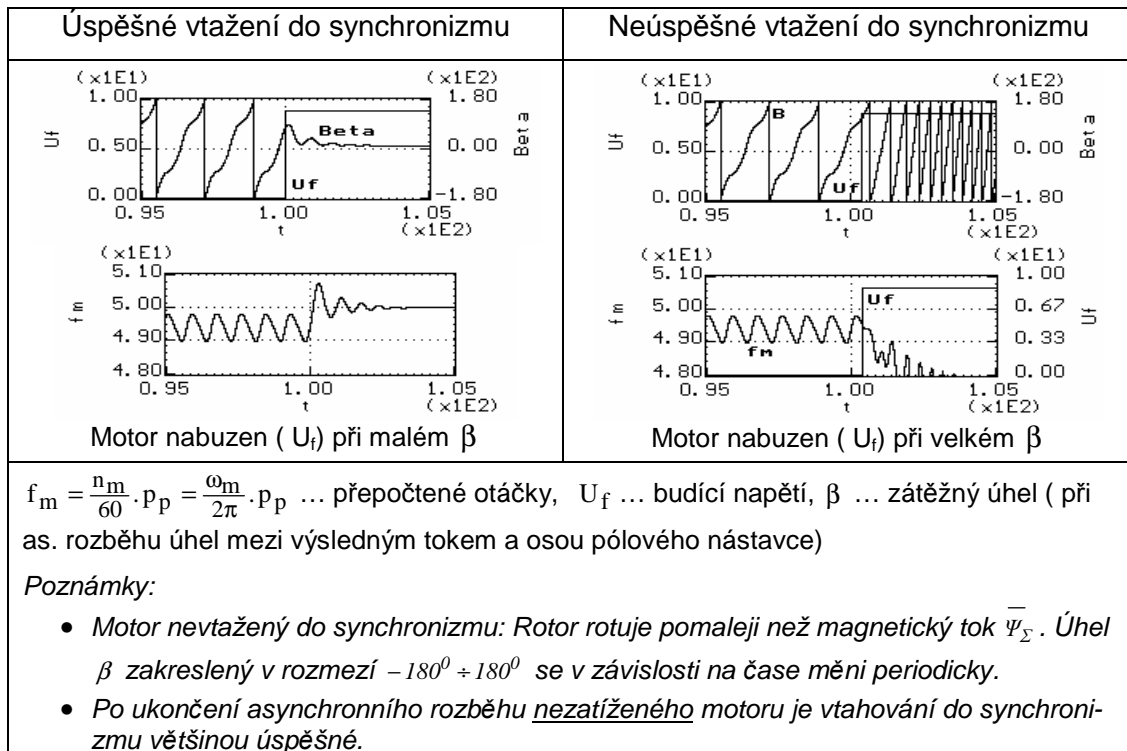
• Asynchronní rozběh

Snížené napětí statoru, budící vinutí spojeno přes ohmický odpor ($R_{sp} \cong 5 \cdot R_b$) nakrátko.

- Budící vinutí rozpojené: Při malých otáčkách se do budícího vinutí indukují velké střídavé napětí. Při rozpojeném vinutí nevznikají úbytky napětí, napětí na kroužkách je rovno indukovanému napětí \Rightarrow během rozběhu je na budících svorkách velké napětí.
- Budící vinutí zkratované přes odpor $R_{sp} \cong 5 \cdot R_b$. Mimo oblast $s \rightarrow 0$ protéká budícím vinutím střídavý proud s cca konstantní amplitudou, nezávisle na odporu R_{sp} (indukované napětí i reaktance budícího vinutí jsou úměrné skluzu s). Odpor R_{sp} omezuje proud při $s \rightarrow 0$. Sníží se střídavá složka momentu a usnadní vtahování do synchronizmu.

„Asynchronním rozběhem“ se motor rozběhne do blízkosti otáček synchronních.

- **Nabuzení motoru** při $\omega_m \rightarrow \omega_s$... motor začíná pracovat jako synchronní.
- „**Vtahování do synchronismu**“ ... složitý jev, při kterém ω_m vzroste na ω_s a zátěžný úhel se ustálí na $\beta < 90^\circ$.

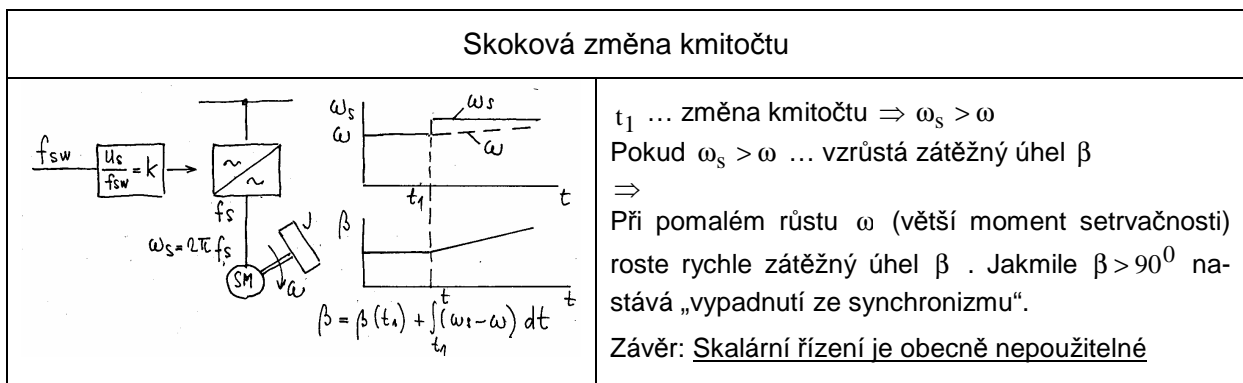


4.3 Výkonové obvody pohonů se synchronním motorem

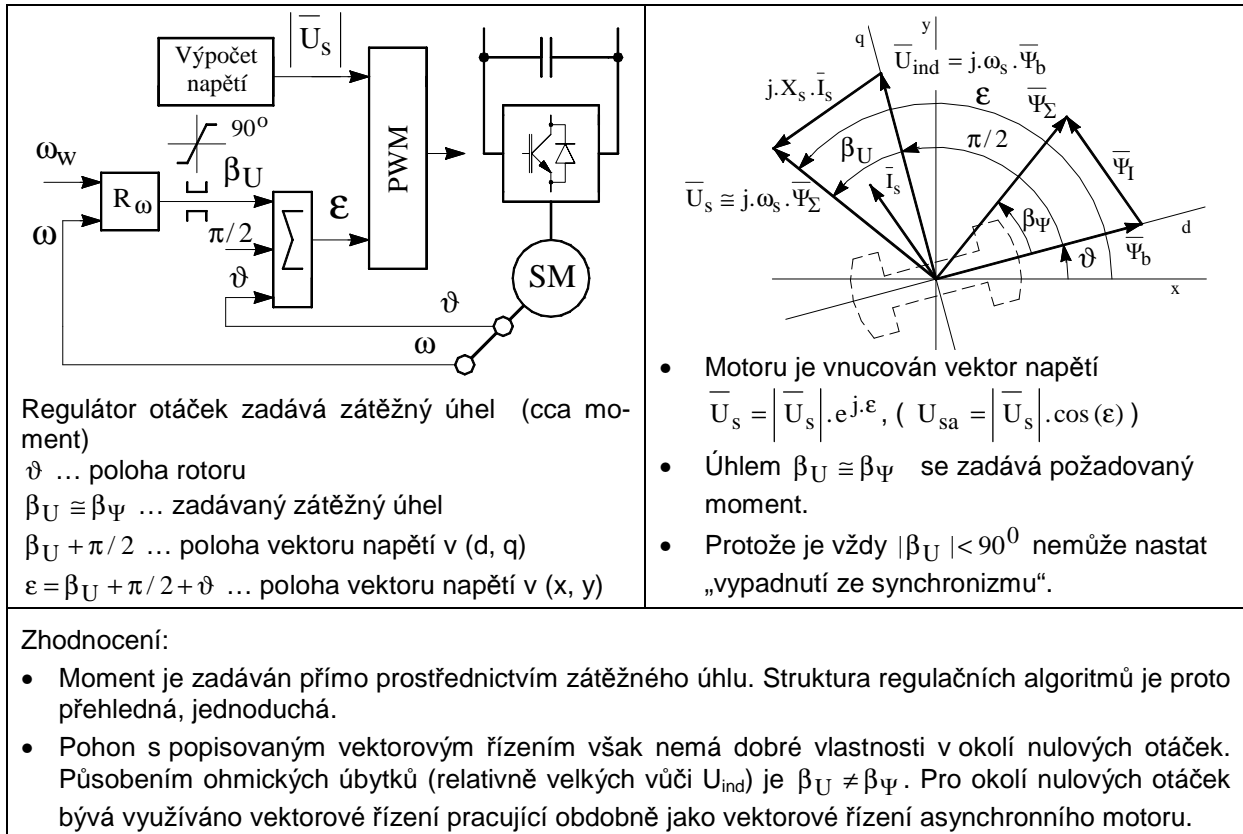
Jsou stejné jako výkonové obvody pohonů s asynchronním motorem. Mohou však dosahovat větších výkonů.

4.4 Možnosti regulace synchronních motorů

4.4.1 ? Skalární řízení ?



4.4.2 Princip vektorového řízení



4.4.3 Motory s permanentními magnety

V současné době se často využívají motory s permanentními magnety. Tyto motory mají menší rozměry než motory asynchronní, proto jsou využívány zejména pro trakční vozidla (tramvaj Škoda ... motor bez převodovky přímo u kola).

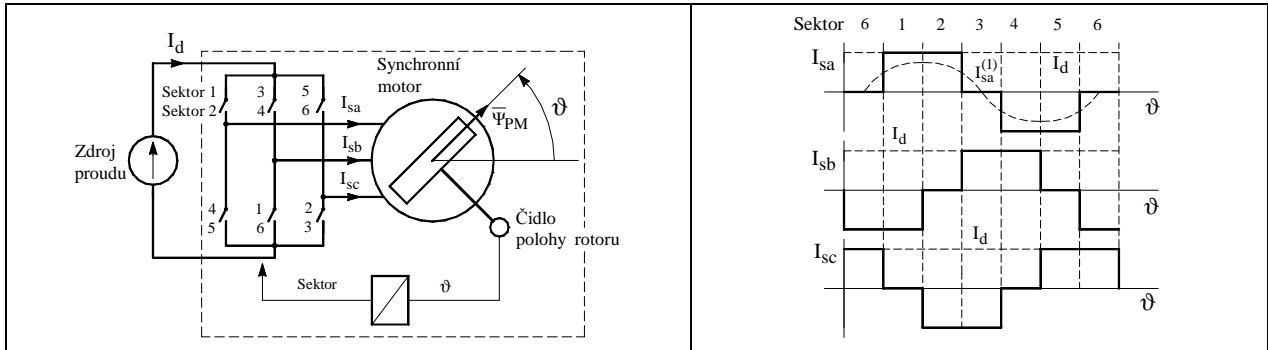
Při vysokých otáčkách je nutno motor (všechny druhy) odbuzovat, aby indukované napětí nebylo vyšší než jmenovité svorkové napětí. Magnetický tok permanentního magnetu Ψ_b samozřejmě nelze zmenšovat, vhodným vektorovým řízením lze statorovým vinutím vybudit takový tok Ψ_I , který zmenší výsledný tok $\bar{\Psi}_\Sigma$.

5 Bezkartáčový stejnosměrný motor

Dále popisovaný motor bývá označován jako bezkartáčový stejnosměrný motor (BLCD). Název „stejnoseměrný“ je opodstatněný, neboť uvedené označení neplatí pro samotný motor, ale pro celou čárkovaně ohraničenou část pohonu.

5.1 Princip činnosti

Základní princip: Komutátor ss motoru (6 lamel) nahrazen střídačem řízeným od polohy rotoru.



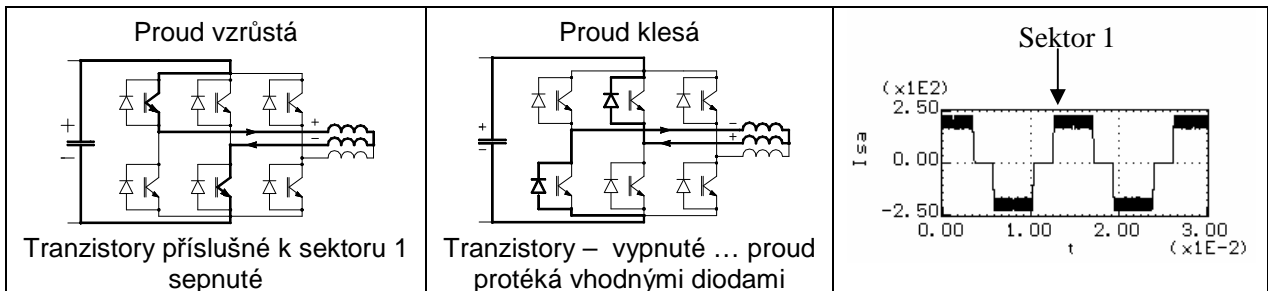
Vyhodnocení sektoru z polohy rotoru:

První harmonická proudu je v režimu pohon „ve fázi“ s napětím indukovaným do statorového vinutí rotujícím magnetem. V režimu brzdění v „protifázi“.

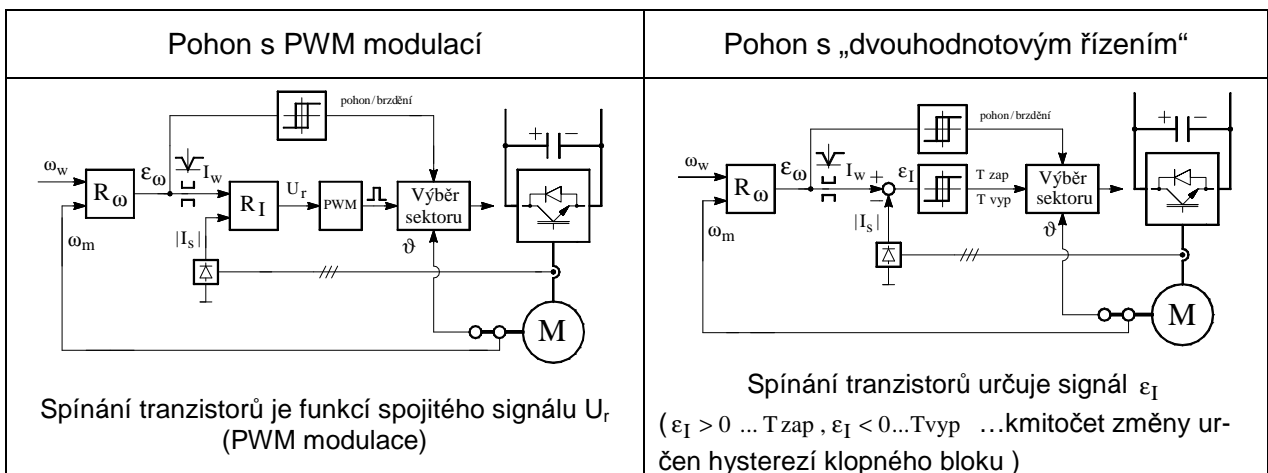
(Režim pohon ... na rozhraní sektorů 1, 2 se do vinutí „a“ indukuje maximální napětí)

Zdroj proudu se realizuje pulsním spínáním tranzistorů střídače.

V následující tabulce je znázorněna činnost střídače v sektoru 1.



5.2 Strukturní schéma pohonu

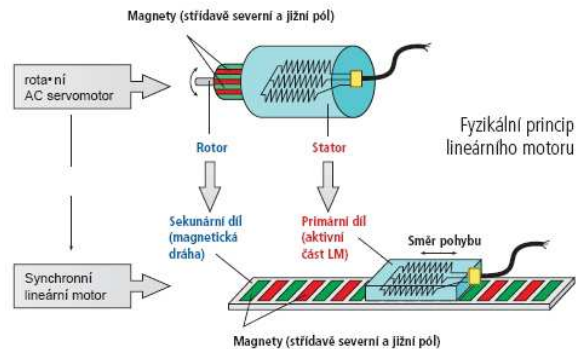


- Regulátor otáček pracuje obvyklým způsobem. Výstupní signál ε_ω je úměrný požadovanému momentu.
 - Regulace momentu se realizuje prostřednictvím regulace proudu (zobrazené 2 varianty).
 - Výběr sektoru určen polohou (úhlem natočení) rotoru a pracovním režimem (pohon, brzdění)
- Pozn.: Regulační algoritmy jsou obdobou regulačních obvodů ss pohonu s pulsním měničem (jsou jednoduché)*

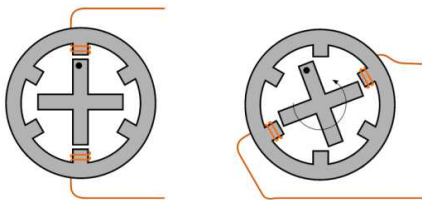
6 Přehled dalších druhů pohonů

6.1 Lineární motor

Lineární synchronní motor si lze představit jako klasický točivý motor pracující na indukčním principu s rotorem i státorem rozvinutým do roviny.



6.2 Reluktanční motor



Rotor (žádné vinutí) se natočí tak, aby siločára mg. toku byla nejkratší.
Rotace vzniká postupným přepínáním cívek statoru.

7 Dimenzování měničů a motorů

„Filosofie“ dimenzování:

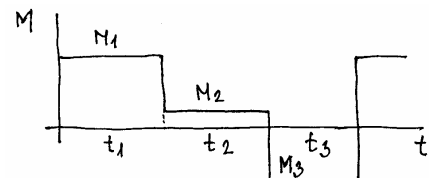
- Parametry navrhovaného měniče/motoru jsou menší než parametry optimální ... při provozu pohonu nastanou poruchy, příp. havárie (napěťový průraz, tepelné přetížení atd)
- Parametry navrhovaného měniče/motoru jsou větší než parametry optimální ... pohon pracuje s horší účinností, s horším účínkem atd.
- Polovodičové měniče mají malou tepelnou časovou konstantu ... parametry je nutno přizpůsobit maximální zátěži
- Motory mají větší tepelnou časovou konstantu ... krátkodobě je lze přetížít. V učebnicích je často popisován návrh optimálních parametrů motoru pomocí metody ekvivalentního momentu.

Princip metody ekvivalentního momentu:

Ztrátový výkon, který způsobuje oteplení motoru je úměrný kvadrátu proudu. U řady motorů je proud úměrný momentu.

Motor pracující trvale s momentem M_{ekv} se pak ohřívá na stejnou teplotu jako motor pracující v naznačeném pracovním cyklu

$$M_{ekv}^2 \cdot (t_1 + t_2 + t_3) = M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + M_3^2 \cdot t_3$$



Projektant vybírá z katalogu motor o jmenovitém momentu $M_N \geq M_{ekv}$

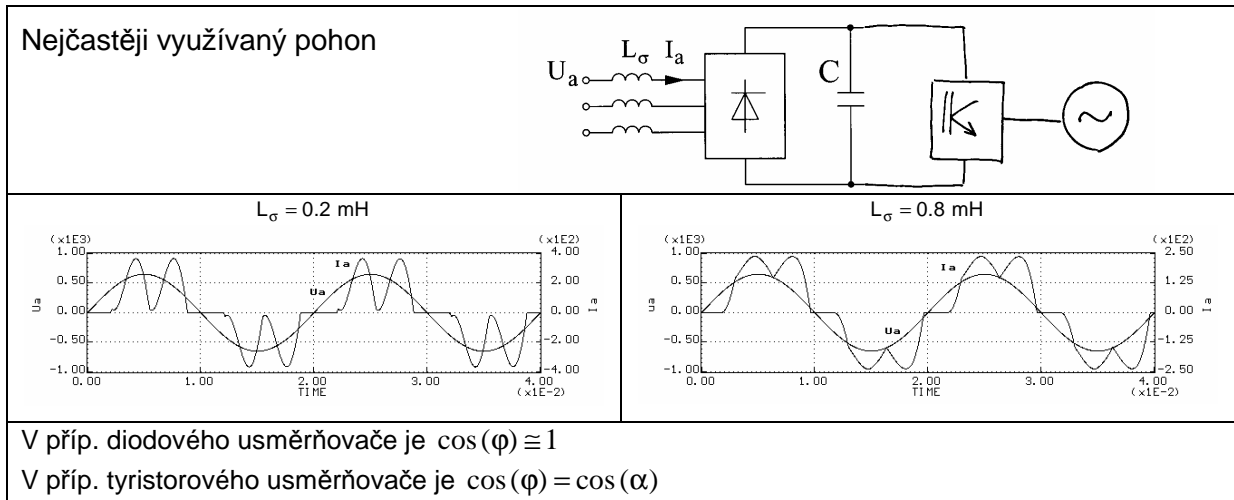
Pozn.: Získat průběh momentu projektovaného pohonu bývá někdy velmi obtížný ... např. sekačka na trávu, válcovací stolice, ...

8 Elektromagnetická kompatibilita

8.1 Průběh proudu odebíraného ze sítě

Elektrické pohony odebírají se sítě proud, s těmito nežádoucími vlastnostmi:

- Rychle se měnící $\cos(\varphi) \neq 1$
- Nesinusový proud



8.2 Kompenzace špatného účinníku

- Kondenzátory připojené na sběrnici pohonu ... odebírají kapacitní proud. Při správně dimenzovaných kondenzátorech je tento proud stejně velký jako induktivní složka proudu všech pohonů připojených na sběrnici.

Při změně zatížení pohonů je nutno přepínat kondenzátorové baterie.

- Kondensátor (Konstantní kapacitní proud) + Střídavý měnič napětí zatížený tlumivkou (Proměnný induktivní proud) → Kompensátor (celek) (Proměnný kapacitní proud)
Účinník rovný 1 lze udržovat i při proměnné zátěži pohonů (bez přepínání kondenzátorů).

8.3 Kompenzace vyšších harmonických

