



**Pracoviště:** Regionální inovační centrum elektrotechniky

**Výzkumná zpráva č.:** 22190 - 044 - 2011

# Regulovaný pohon se synchronním motorem – varianty řídicích algoritmů

**Druh úkolu:** Vědecko- výzkumný  
**Řešitelé:** K. Zeman  
**Vedoucí úkolu:** doc. Ing. Z. Peroutka, Ph.D.  
**Počet stran:** 34  
**Datum vydání:** prosinec 2011  
**Revize:** 1

Tato zpráva vznikla s podporou projektu TA01010863 a CZ.1.05/2.1.00/03.0094

## Anotace

Zpráva popisuje 4 varianty algoritmů regulačních a řídicích obvodů synchronního motoru velkého výkonu.

## Obsah

|       |                                                                                |    |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | ÚVOD.....                                                                      | 3  |
| 2     | SIMULOVANÝ MOTOR.....                                                          | 3  |
| 3     | MAGNETICKÉ TOKY MOTORU .....                                                   | 4  |
| 4     | PRACOVNÍ REŽIMY POHONU.....                                                    | 5  |
| 4.1   | Pracovní režim 1 – maximální moment při jmenovitém proudu.....                 | 6  |
| 4.2   | Pracovní režim 2 – $\omega > \omega_N$ , střídač na hranici přemodulování..... | 7  |
| 4.3   | Pracovní režim 3 – minimální celkové Jouleovy ztráty .....                     | 8  |
| 4.4   | Pracovní režim 4 – $\cos(\varphi) = 1$ .....                                   | 12 |
| 4.5   | Nelinearity zajišťující provoz motoru v režimech 3, 4.....                     | 14 |
| 4.6   | Porovnání pracovních režimů 1, 3, 4.....                                       | 15 |
| 5     | BLOKY ŘÍDÍCÍCH ALGORITMŮ.....                                                  | 16 |
| 5.1   | Blok „vyhodnocení vektoru napětí“ .....                                        | 16 |
| 5.2   | Blok „výpočet vektoru proudu“ .....                                            | 17 |
| 5.3   | Blok výpočet vektoru magnetického toku statoru .....                           | 17 |
| 6     | ALGORITMY ŘÍDÍCÍCH A REGULAČNÍCH OBVODŮ .....                                  | 18 |
| 6.1   | Strukturní schéma pohonu.....                                                  | 18 |
| 6.2   | Parametry simulovaných regulátorů.....                                         | 19 |
| 6.3   | Algoritmy varianty 1 .....                                                     | 19 |
| 6.3.1 | Omezován magnetický tok $\Psi_{hd}$ .....                                      | 19 |
| 6.3.2 | Omezován tok $\Psi_s$ .....                                                    | 22 |
| 6.4   | Algoritmy varianty 2 .....                                                     | 24 |
| 6.5   | Algoritmy varianty 3 .....                                                     | 26 |
| 6.6   | Algoritmy varianty 4 .....                                                     | 29 |

## 1 Úvod

Předkládaná zpráva rozšiřuje problematiku, popisovanou ve zprávě [1]. V [1] jsou popsány řídicí a regulační algoritmy pohonu se synchronním motorem velkého výkonu, navržené dle kritéria optimality – maximální moment motoru při jmenovitém proudu.

V předkládané zprávě je proveden návrh dalších variant algoritmů, navržených dle těchto kritérií :

- Maximální moment motoru při jmenovitém proudu
  - Odbuzování realizováno složkou proudu statoru  $I_{sd}$  ([1]) – varianta 1
  - Odbuzování realizováno snižováním budicího proudu  $I_f$  – varianta 2
- Minimální Jouleovy ztráty – varianta 3
- Nulový fázový posun mezi 1. harmonickými napětí a proudu motoru ... pracovní režim výhodný pro střídač – varianta 4

K simulacím byl využíván motor ČKD o výkonu 4 MW .

## 2 Simulovaný motor

|                |      |     |
|----------------|------|-----|
| $P_n$          | 4000 | kW  |
| $U_s$          | 6000 | V   |
| $2p$           | 40   |     |
| $f$            | 50   | Hz  |
| $I_n$          | 448  | A   |
| $\cos \varphi$ | 0,9  | (-) |
| $I_{bn}$       | 180  | A   |
| $U_{bn}$       | 270  | V   |

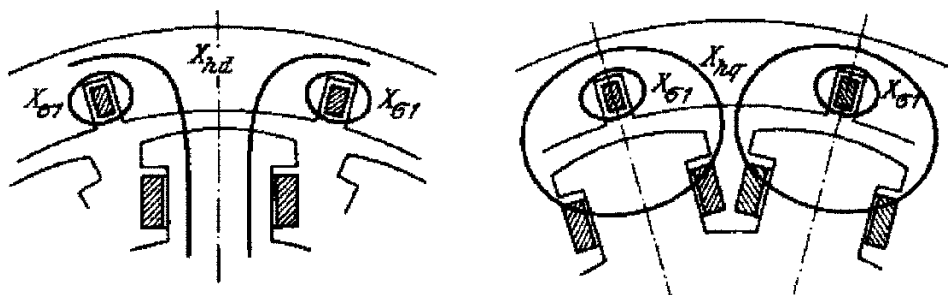
|         |       |                |
|---------|-------|----------------|
| $X''_d$ | 1,15  | $\Omega$       |
| $X''_q$ | 1,10  | $\Omega$       |
| $J$     | 20440 | $\text{kgm}^2$ |

|                          |        |          |
|--------------------------|--------|----------|
| $R_a$                    | 0,0603 | $\Omega$ |
| $R_f$                    | 0,0070 | $\Omega$ |
| $R_D$                    | 0,2928 | $\Omega$ |
| $R_Q$                    | 0,2704 | $\Omega$ |
| $L_{hd}$                 | 0,0176 | H        |
| $L_{hq}$                 | 0,0104 | H        |
| $L_{a\sigma}$            | 0,0019 | H        |
| $L_{f\sigma}$            | 0,0048 | H        |
| $L_{D\sigma}$            | 0,0032 | H        |
| $L_{Q\sigma}$            | 0,0019 | H        |
| Přepočet budicího proudu |        |          |
| $k_{If}$                 | 14,721 | (-)      |

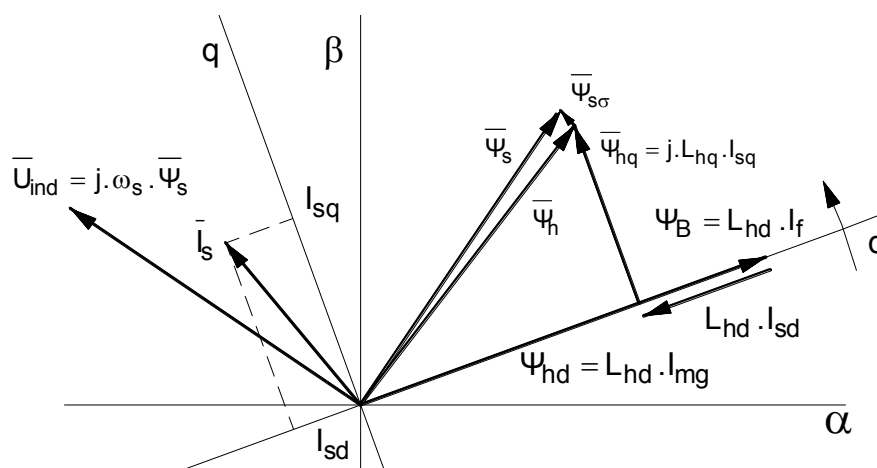
| Přepočtené veličiny                             |                                                                                            |
|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Skutečný odpor budího vinutí                    | $R_b = \frac{U_{bn}}{I_{bn}} = 1,5 \, \Omega$                                              |
| Přepočtený odpor budícího vinutí                | $R_f = 0,007 \, \Omega \quad (R_b \cdot \frac{1}{k_{lf}^2} = 0.00692 \, \Omega)$           |
| Přepočtený budící proud                         | $I_{fn} = I_{bn} \cdot k_{lf} = 2650 \, A$                                                 |
| Jmenovité Jouleovy ztráty v budícím vinutí      | $\Delta P_b = R_b \cdot I_b^2 = 48600 \, W$<br>$\Delta P_f = R_f \cdot I_f^2 = 48596 \, W$ |
| Ztráty v budícím vinutí při optimálním nabuzení | $(\Delta P_f)_{opt} = R_f \cdot I_{f\_opt}^2 = 6920 \, W$<br>$I_{f\_opt} \cong 1000 \, A$  |
| Jmenovité Jouleovy ztráty ve statorovém vinutí  | $\Delta P_s = 3 \cdot R_a \cdot I_n^2 = 36307 \, W$                                        |

### 3 Magnetické toky motoru

V teorii elektrických strojů s vyniklými póly se uvažují magnetické toky v podélné a příčné ose stroje.

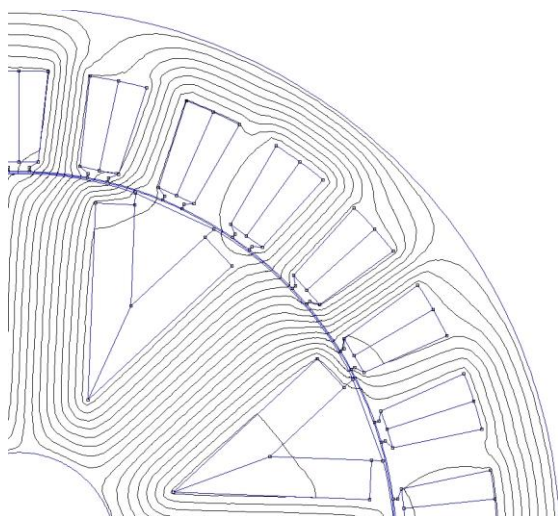


Této úvaze odpovídá tento vektorový diagram



|                        |                                     |                 |                                       |
|------------------------|-------------------------------------|-----------------|---------------------------------------|
| $I_f$                  | Budící proud                        | $\Psi_B$        | Tok vybuzený budícím vinutím          |
| $\bar{\Psi}_h$         | Výsledný tok ve vzduchové mezeře    | $\bar{\Psi}_s$  | Výsledný tok v obvodu statoru         |
| $\Psi_{hd}$            | Složka $\bar{\Psi}_h$ v podélné ose | $\Psi_{hq}$     | Složka $\bar{\Psi}_h$ v příčné ose    |
| $\bar{\Psi}_{s\sigma}$ | Rozptylový tok statoru              | $\bar{U}_{ind}$ | Vektor napětí indukovaného do statoru |

Siločáry skutečného toku motoru s vyniklými póly jsou nakresleny na následujícím obrázku (autor výpočtu Ing. Karel Hruška)



V oblasti malých otáček je nutno snižováním napětí střídače omezovat magnetický tok, aby nenastalo přesycení magnetického obvodu.

Výpočet skutečného toku je „v reálném čase“ neproveditelný.

Omezovat lze pouze tyto toky:

- $\Psi_{hd}$
- $|\bar{\Psi}_h|$
- $|\bar{\Psi}_s|$

Magnetický tok  $\Psi_{hd}$  lze omezovat jednoduše, bez regulátoru. K omezování toků  $|\bar{\Psi}_h|$ ,  $|\bar{\Psi}_s|$  je nutno doplnit algoritmy o regulátory uvedených toků. Regulátory zhoršují dynamické vlastnosti pohonu.

Výběr omezovaného toku a jeho konkrétní hodnotu by měl posoudit projektant motoru.

Motor naprázdno, připojený ke jmenovitému napětí:

$$|\bar{\Psi}_h| = \Psi_{hd} \cong \frac{U_{sN} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{sN}} \cong 15 \text{ Vs}$$

## 4 Pracovní režimy pohonu

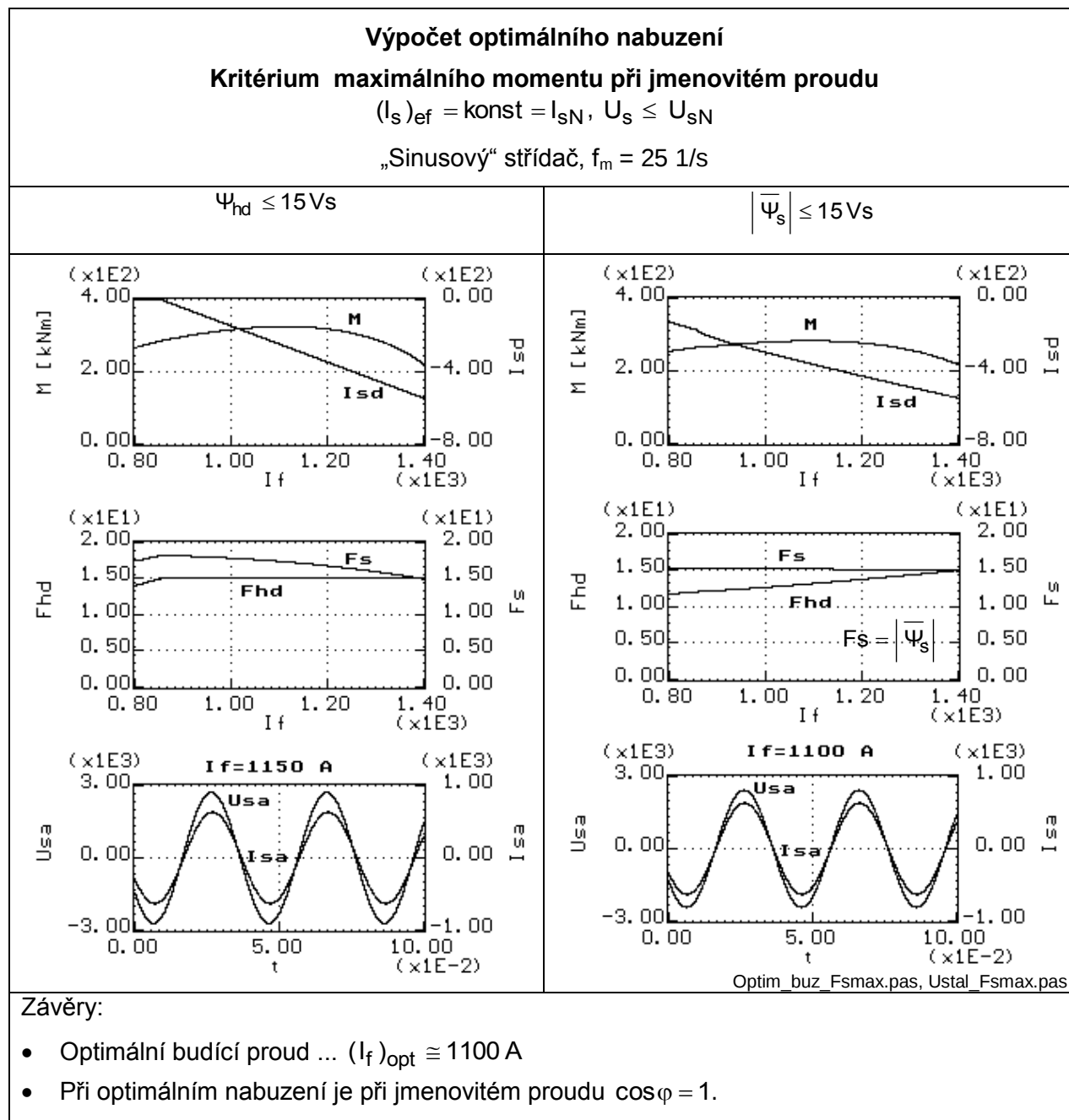
Pracovní režimy :

- Režim 1 – jmenovitý magnetický tok, optimální budící proud stanovený dle kritéria: Maximální moment při jmenovitém proudu.
- Režim 2 – v oblasti vysokých otáček motor odbuzovaný z důvodu zachování říditelnosti střídače
- Režim 3 – motor odbuzovaný s cílem: Minimální Jouleovy ztráty

- Režim 4 – motor odbuzovaný s cílem : Nulový fázový posun mezi 1. harmonickými proudy a napětí. (Režim 4 je vhodný pro činnost střídače)

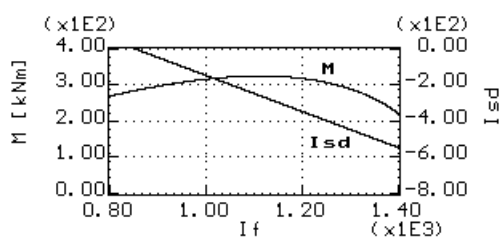
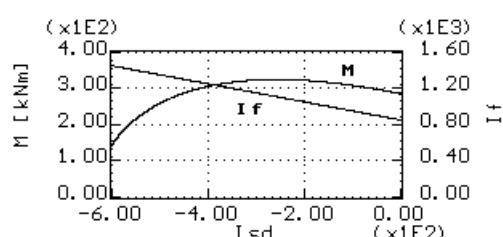
#### 4.1 Pracovní režim 1 – maximální moment při jmenovitém proudu

Při optimálním nabuzení poskytuje motor při jmenovitém proudu maximální moment. Ten se určí jako extrém funkce  $M = fce(I_f)$  (omezování zvoleného magnetického toku po změnách  $I_f$  se realizuje zvětšováním  $|I_{sd}|$ ) nebo jako extrém  $M = fce(I_{sd})$  (omezování zvoleného magnetického toku po změnách  $I_{sd}$  se realizuje snižováním  $I_f$ )



Výpočet optimálního nabuzení lze provádět dvojím způsobem:

- 1) Proměnné  $I_f$ , prostřednictvím  $I_{sd}$  omezován magnetický tok (využívají algoritmy var. 1)
- 2) Proměnné  $I_{sd}$ , prostřednictvím  $I_f$  omezován magnetický tok (využívají algoritmy var. 2)

Opt\_buz\_I<sub>f</sub>Opt\_buz\_I<sub>sd</sub>

## 4.2 Pracovní režim 2 – $\omega > \omega_N$ , střídač na hranici přemodulování

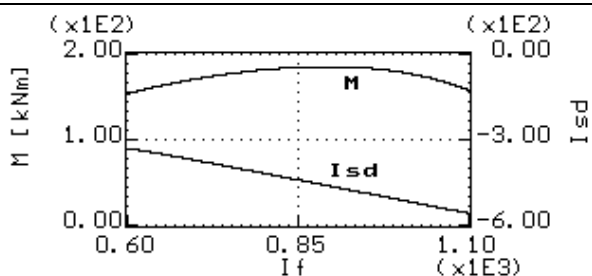
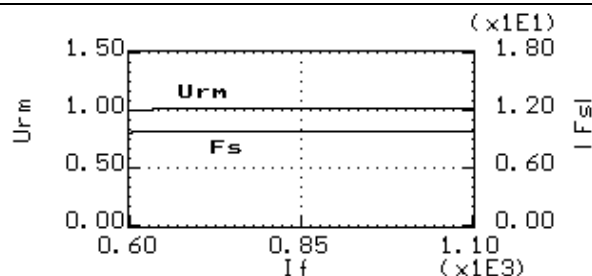
V oblasti vysokých otáček je nutno motor odbuzovat tak, aby se střídač nedostal do režimu přemodulování.

### Výpočet optimálního nabuzení v režimu 2

**Kritérium maximálního momentu při jmenovitém proudu**

$$(I_s)_{ef} = \text{konst} = I_{sN}, \quad U_s \leq U_{sN}$$

„Sinusový“ střídač,  $f_m = 80$  1/s

Optim buz F<sub>hmax</sub>U<sub>fm</sub>... řídící signál střídače

**Závěry:**

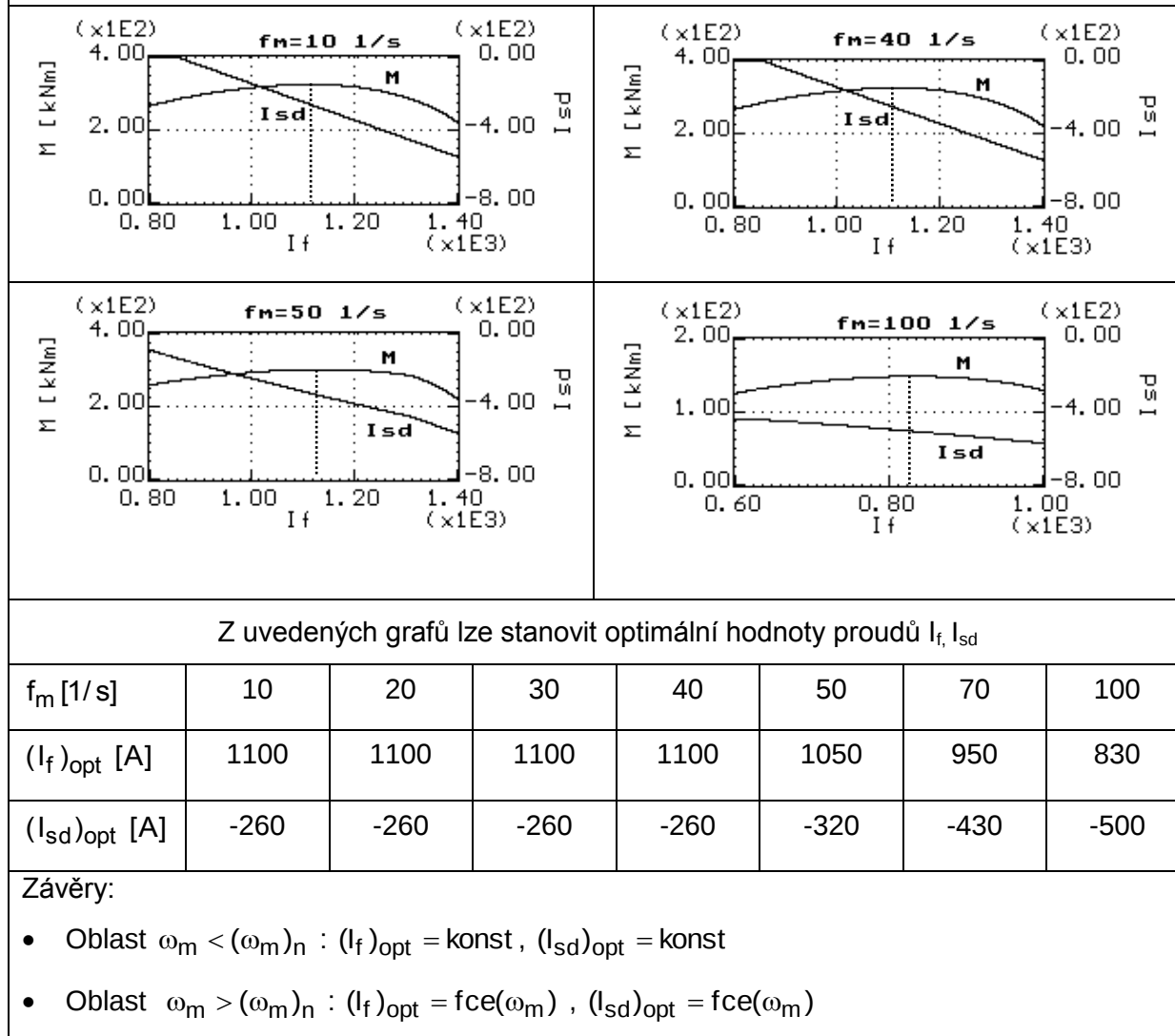
- V oblasti  $\omega > \omega_N$  se  $(I_f)_{opt}$  mírně snižuje
- Snížení mg. toku zajišťuje regulátor  $R_{Ur}$  prostřednictvím zvětšování  $|I_{sd}|$  (udržuje se říditelnost střídače).

### Výpočet optimálního nabuzení v režimech 1, 2

Kritérium maximálního momentu při jmenovitém proudu

$$(I_s)_{ef} = \text{konst} = I_{sN}, U_s \leq U_{sN}, \Psi_{hd} \leq 15Vs$$

„Sinusový“ střídač

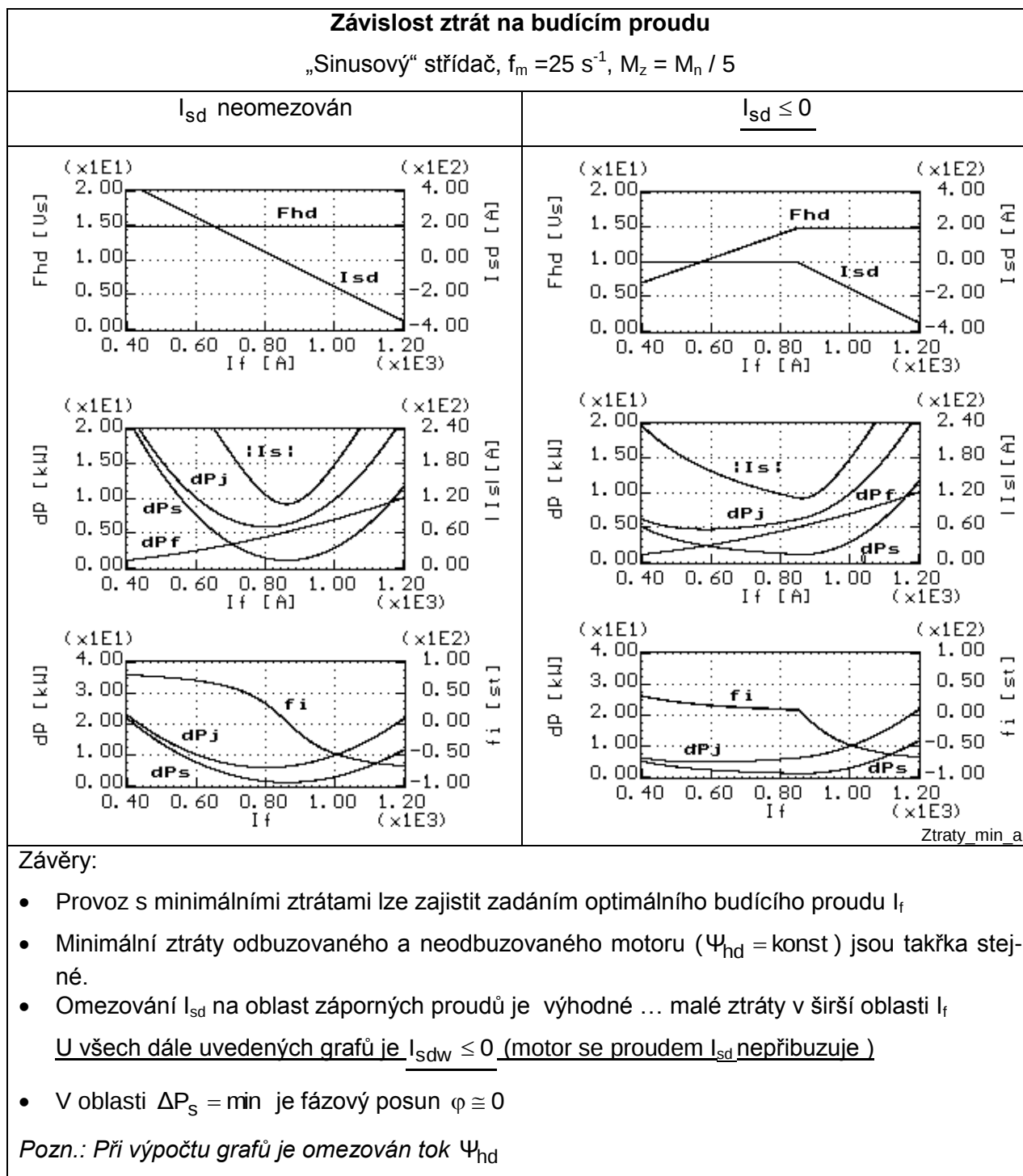


### 4.3 Pracovní režim 3 – minimální celkové Jouleovy ztráty

V pracovním režimu 3 je součet Jouleových ztrát ( $\Delta P_j$ ) ve statoru ( $\Delta P_s$ ), v budícím vinutí ( $\Delta P_f$ ) a v tlumiči ( $\Delta P_{tl}$ ) (při napájení motoru střídačem protéká tlumičem proud  $i$  v ustáleném stavu) minimální.

#### Teoretická úvaha

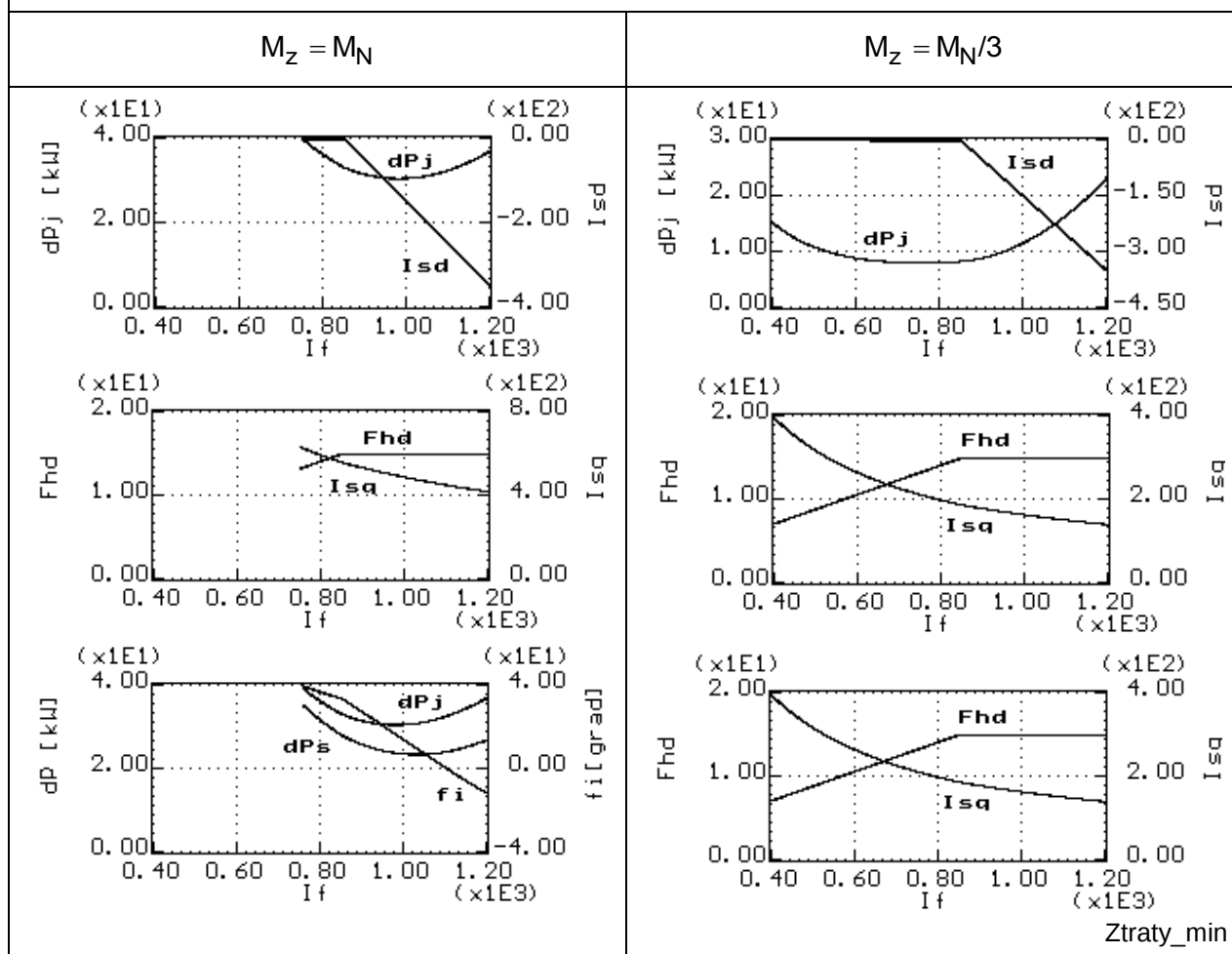
U pohonů s asynchronními motory je při malém zatěžovacím momenty vhodné motor odbudit snížením složky proudu  $I_{sd}$ . U pohonů se synchronními motory je situace složitější ... magnetický tok je buzen součtem proudů  $I_f + I_{sd}$ . Tvzení dokazují následující grafy.



### Výpočet optimálního nabuzení

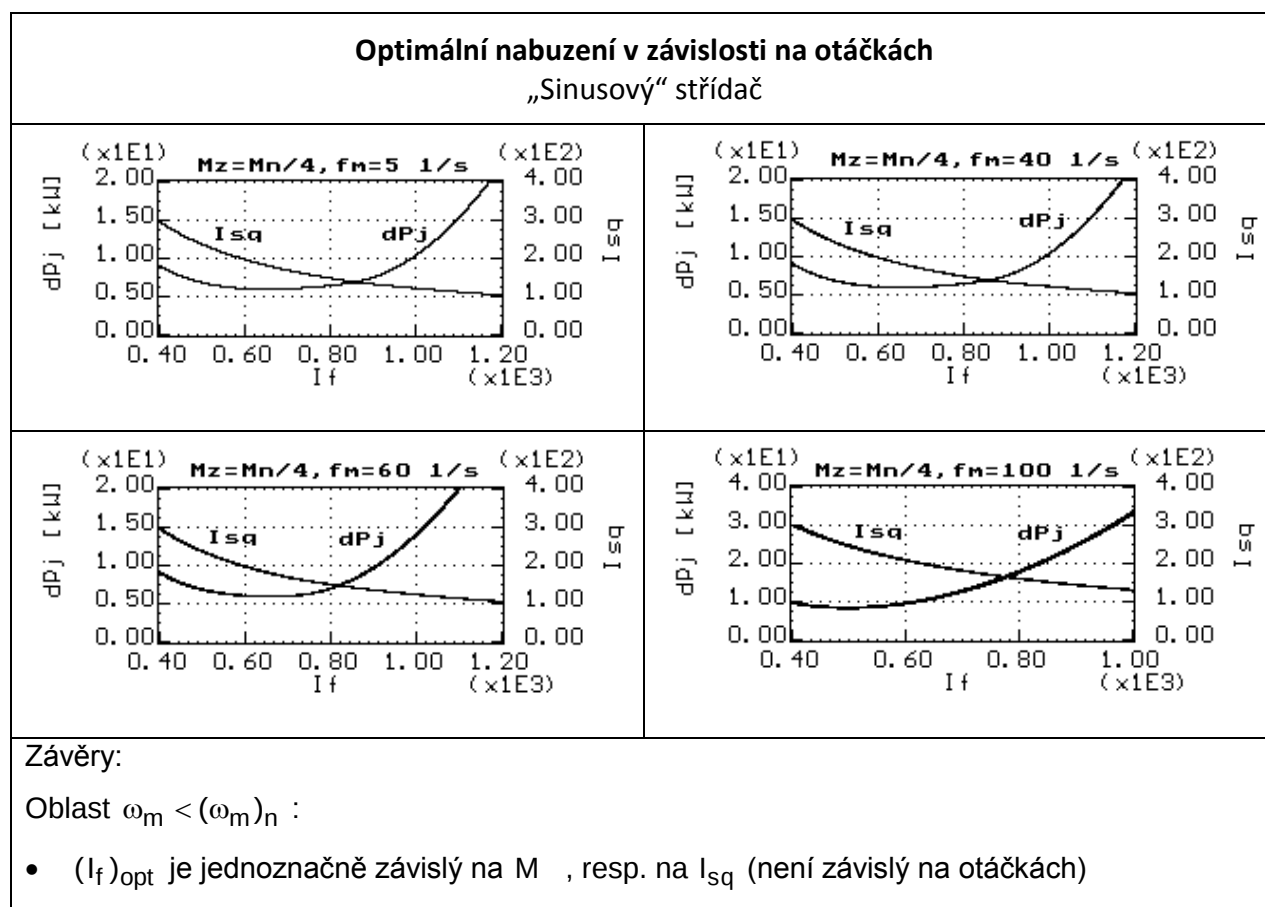
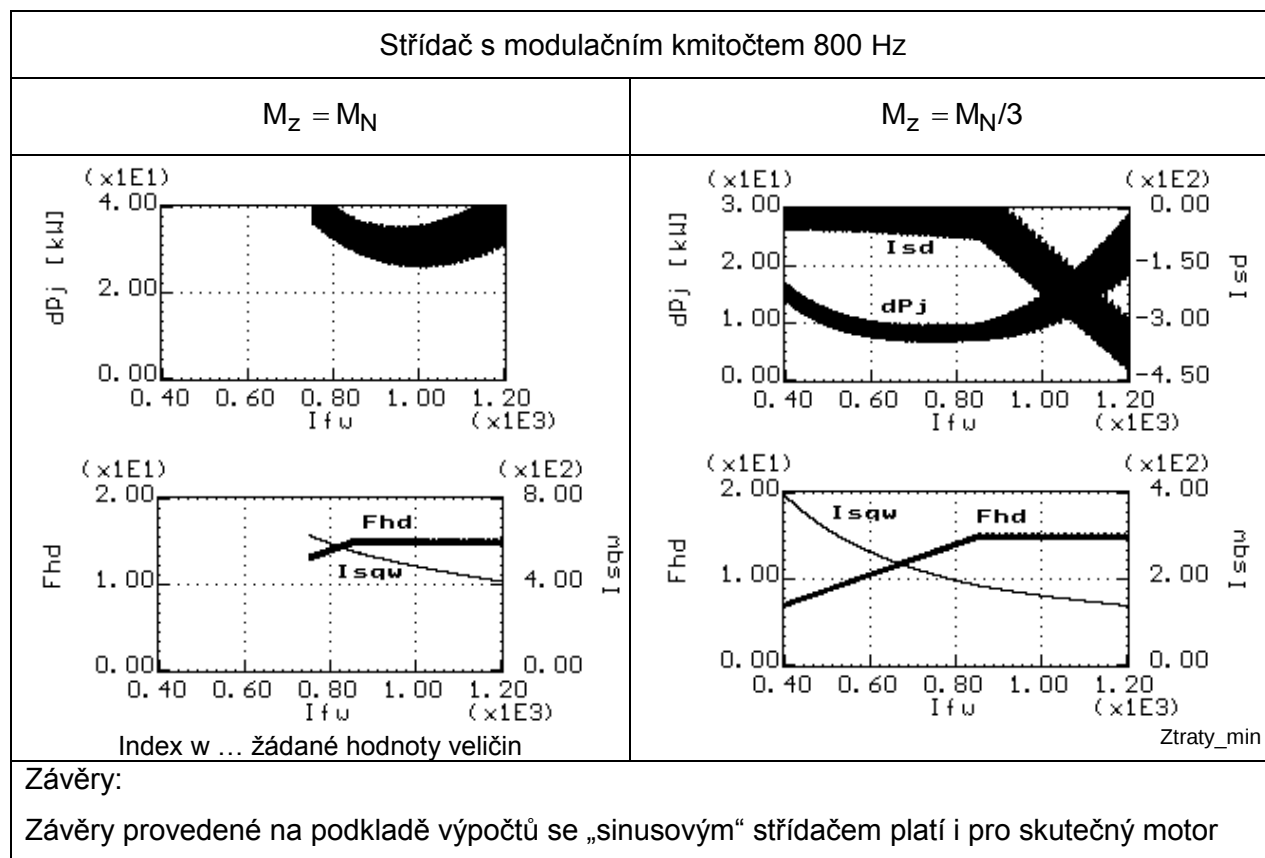
#### Kritérium minimálních celkových Jouleových ztrát

„Sinusový“ střídač,  $f_m = 25 \text{ 1/s}$ ,  $I_{sd} \leq 0$



#### Závěry:

- Při zátěži  $M_z < \text{cca } M_N/2$  jsou ztráty  $\Delta P_j$  minimální při  $I_{sd} = 0$
- Při zátěži  $M_z > \text{cca } M_N/2$  vznikají minimální ztráty  $\Delta P_j$  při  $I_{sd} < 0$
- Minimální ztráty ve statoru  $\Delta P_s$  vznikají vždy při  $I_{sd} < 0$
- Optimální budící proud je funkcí momentu, moment se však obtížně vyhodnocuje. Optimální budící proud lze vyhodnotit nelinearitou  $(I_{fw})_{\text{opt}} = f_{ce}(I_{sqw})$
- Při minimálních celkových ztrátách  $\Delta P_j$  je  $\cos \varphi \neq 1$
- Při minimálních ztrátách ve statoru  $\Delta P_s$  je  $\cos \varphi \cong 1 \dots$  viz kap. 0



Oblast  $\omega_m > (\omega_m)_n$  :

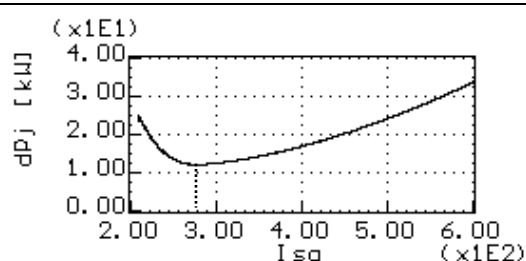
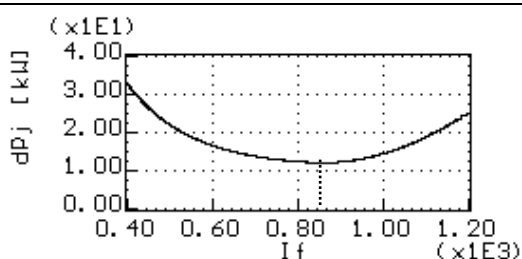
- $(I_f)_{opt} = fce(M, \omega_m)$  , resp.  $(I_f)_{opt} = fce(I_{sq}, \omega_m)$
- Při rychlých přechodových jevech může při optimálně nabuzeném motoru nastat ztráta říditelnosti střídače  $\Rightarrow$

V oblasti  $\omega_m > (\omega_m)_n$  není vhodné provozovat pohon v režimu 3.

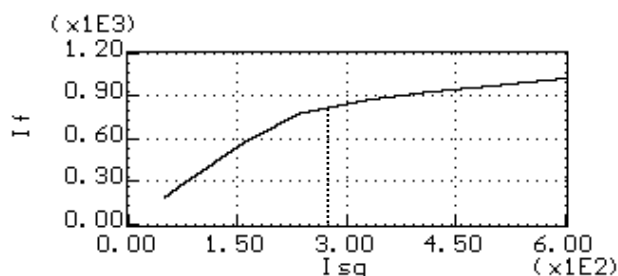
### Optimální nabuzení v závislosti na složce proudu $I_{sq}$

„Sinusový“ střídač , proměnné  $I_f$

$$f_m = 25 \text{ 1/s}, M_z = M_n / 2$$



Ztraty\_min



Tvar nelinearit

Závěr:

Optimální budící proud je funkcí momentu. Ten se obtížně vyhodnocuje, optimální budící proud lze odvozovat od složky proudu  $I_{sq}$ , resp. od požadované složky  $I_{sqw}$ .

## 4.4 Pracovní režim 4 – $\cos(\varphi) = 1$

Pro střídač je údajně výhodné, když motor pracuje s  $\cos(\varphi) = 1$ . Motor v tomto režimu pracovat může, žádné výhody to však nepřináší.

Teoretická úvaha:

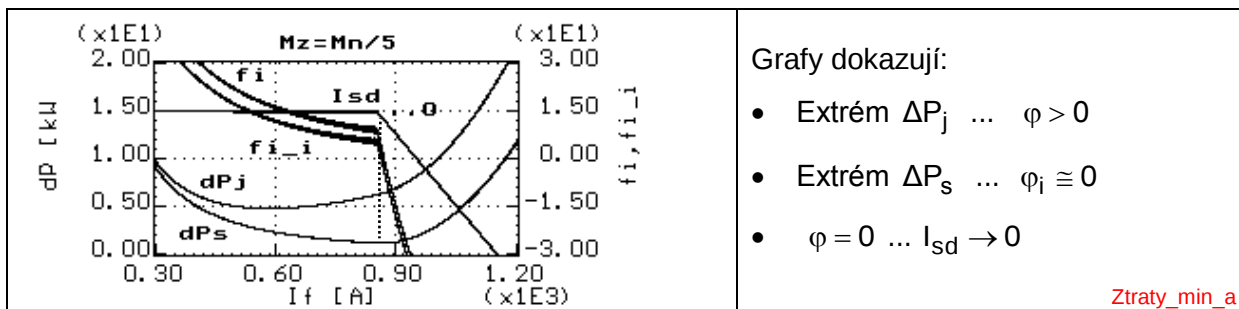
$$P_m = M \cdot \omega_m \quad \dots \quad \text{výkon motoru}$$

$$P_\delta = 3 \cdot U_{ind} \cdot I_s \cdot \cos(\varphi_i) = P_m \quad \dots \quad \text{výkon ve vzduchové mezeře}$$

$$\Delta P_s = 3 \cdot R_s \cdot I_s^2 \quad \dots \quad \text{ztráty ve statoru} \Rightarrow \text{minimální } \Delta P_s \text{ vzniká při } \cos(\varphi_i) = 1$$

### Závěry:

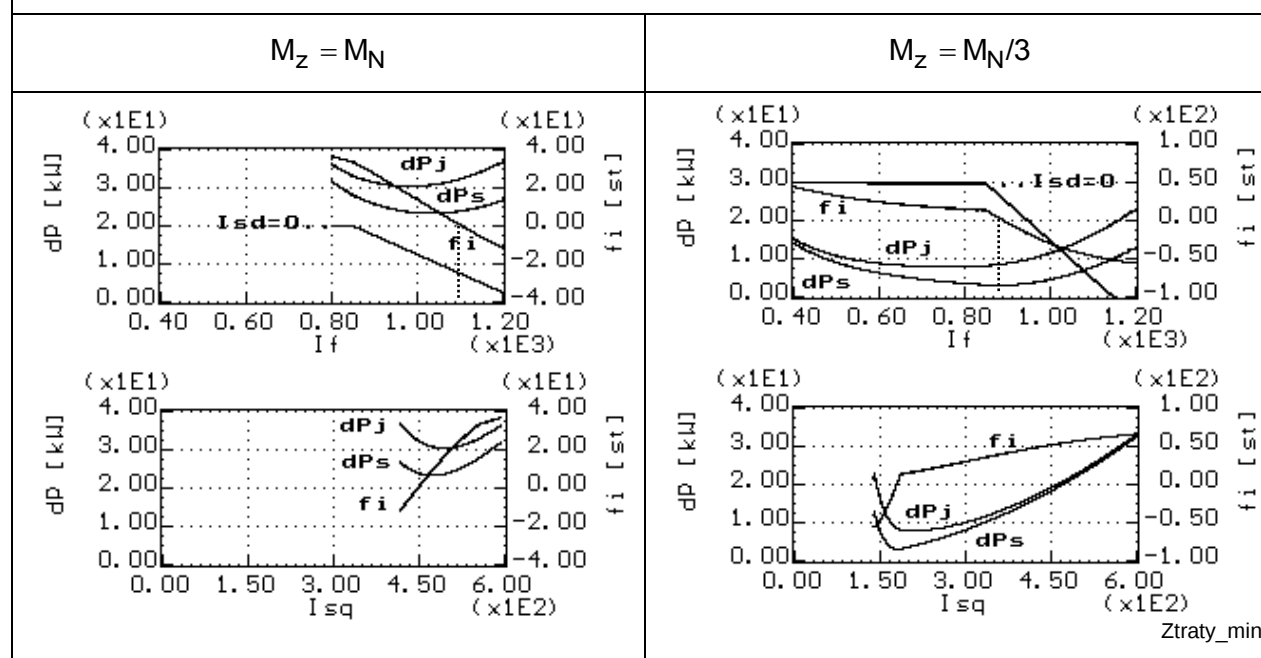
- Pracovní režim 4 je blízký režimu 3, optimální budící proud je poněkud větší
- Většina zásad odvozená pro režim 3 platí i pro režim 4



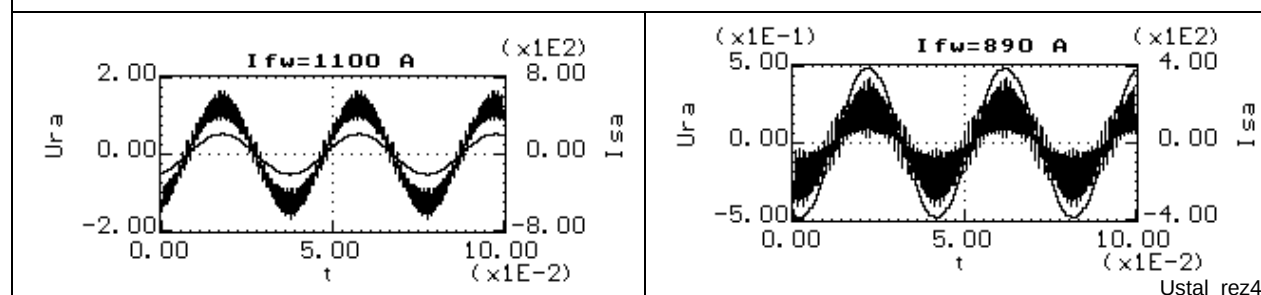
### Výpočet optimálního nabuzení

Kritérium  $\cos \varphi = 1$

„Sinusový“ střídač,  $f_m = 25$  1/s



### Modulační kmitočet střídače 800 Hz



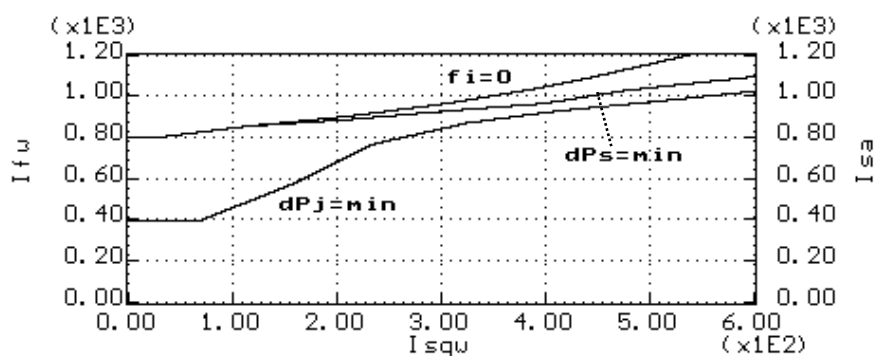
### Závěry:

- V oblasti  $\omega_m < (\omega_m)_n$  lze vhodným nabuzením zajistit provoz  $\cos(\varphi) = 1$

Pozn.:

V oblasti  $\omega_m > (\omega_m)_n$  není provoz v režimu 4 vhodný (nebezpečí ztráty říditelnosti střídače)

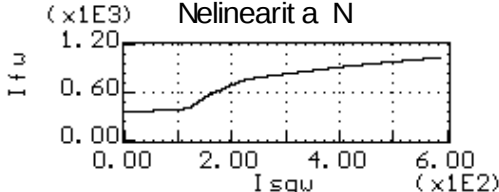
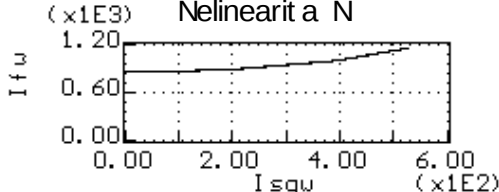
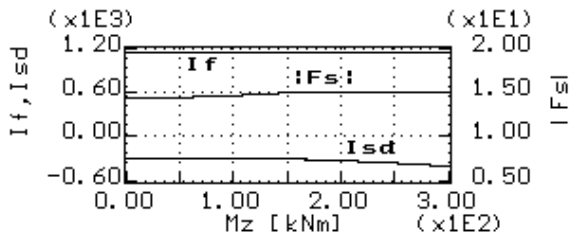
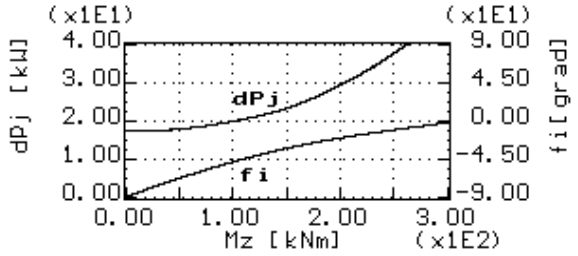
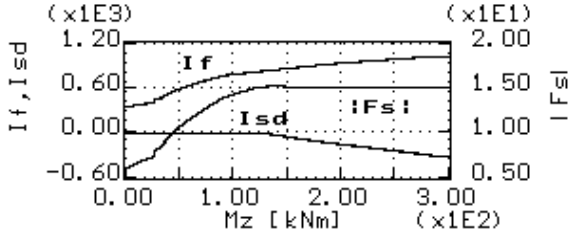
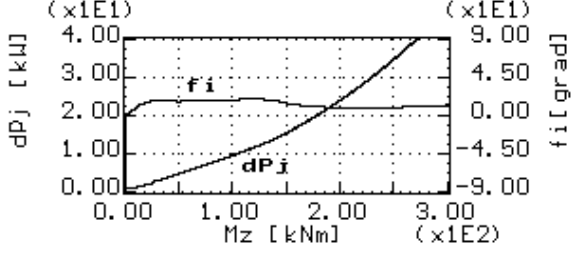
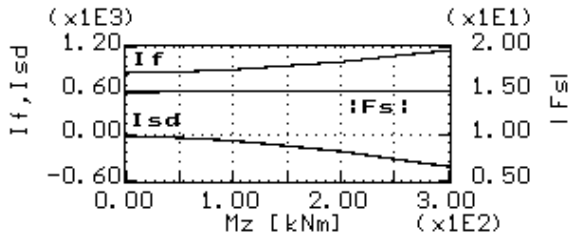
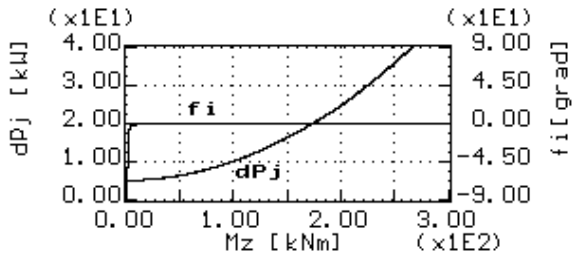
## 4.5 Nelinearity zajišťující provoz motoru v režimech 3, 4



Při režimech  $\varphi = 0$ ,  $\Delta P_s = \min$  pracuje motor stále s  $I_{sdw} < 0$

Při režimu  $\Delta P_j = \min$  pracuje motor v oblasti  $I_{fw} < \text{cca } 800 \text{ A}$  s  $I_{sdw} = 0$ ,  
v oblasti  $I_{fw} > \text{cca } 800 \text{ A}$  s  $I_{sdw} < 0$   
(z tohoto důvodu je nelinearita  $\Delta P_j = \min$  „zalomená“)

## 4.6 Porovnání pracovních režimů 1, 3, 4

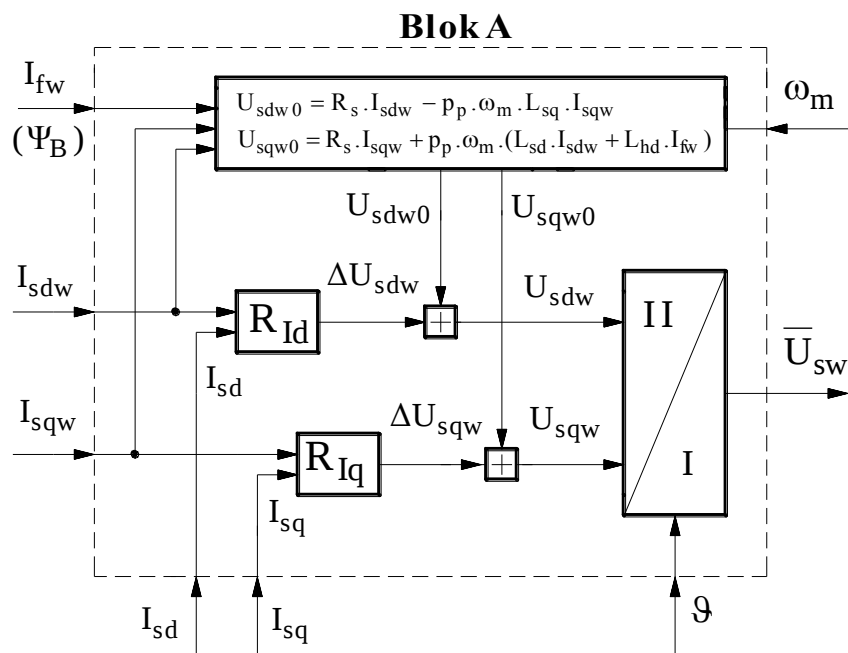
| <b>Porovnání pracovních režimů – závislost veličin na momentu zátěže</b><br>„Sinusový“ střídač, $f_m = 25 \text{ 1/s}$ , omezován tok $ \overline{\Psi}_s $                                                              |                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Režim 1                                                                                                                                                                                                                  | Režim 3                                                                                                                                                                                                                    | Režim 4                                                                                                                                                                                                                      |
| $I_{fw} = \text{konst}$                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                          |                                                                                                                                           |
| <br> <p style="text-align: right;">Porovnani_rez1</p> | <br> <p style="text-align: right;">Porovnani_rez3</p> | <br> <p style="text-align: right;">Porovnani_rez4</p> |
| $I_f, I_{sd},  \overline{\Psi}_s $ stále takřka konstantní                                                                                                                                                               | Při malých $M_z$ <ul style="list-style-type: none"> <li><math>I_{sd} = 0 \Rightarrow \varphi \neq 0</math></li> <li><math> \overline{\Psi}_s  &lt; \Psi_n</math></li> </ul>                                                | Při malých $M_z$ <ul style="list-style-type: none"> <li><math>I_{sd} \neq 0 \Rightarrow I_f</math> větší než v režimu 3</li> <li><math> \overline{\Psi}_s  = \Psi_n</math></li> </ul>                                        |

## 5 Bloky řídicích algoritmů

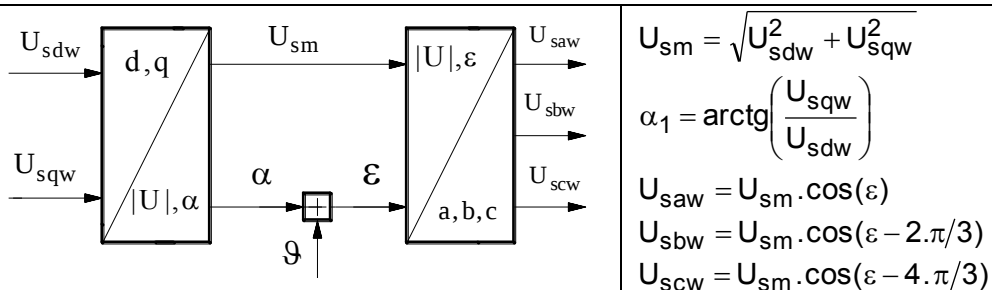
Navržené algoritmy řídicích algoritmů, zajišťující provoz pohonu v režimech 1, 2 jsou popsány ve zprávě [1] jako celek.

Pro snadnější popis více variant algoritmů jsou algoritmy rozděleny do bloků.

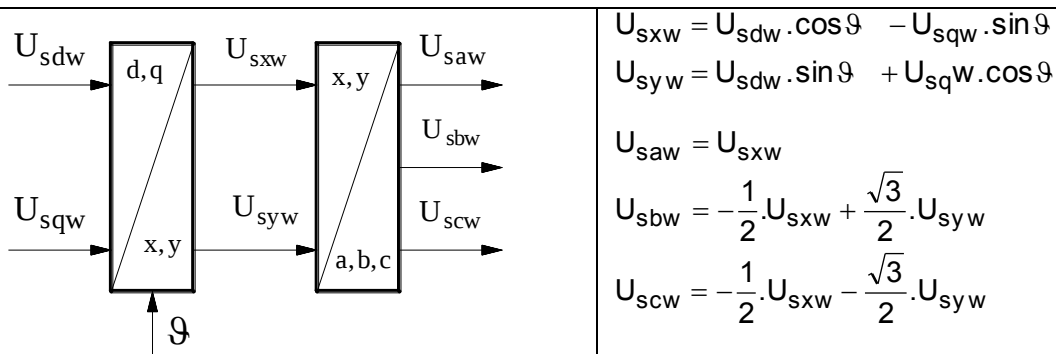
### 5.1 Blok „vyhodnocení vektoru napětí“



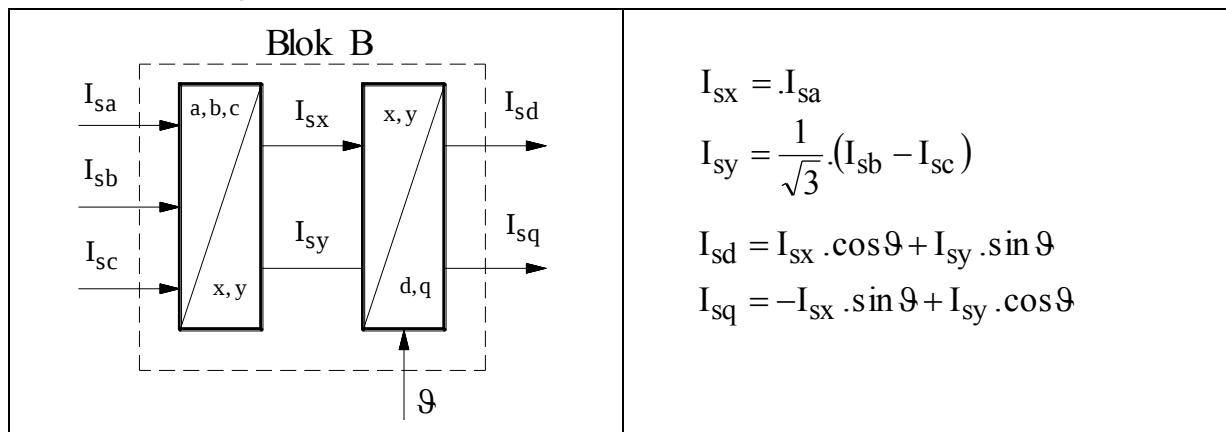
#### Blok II/I ... varianta 1



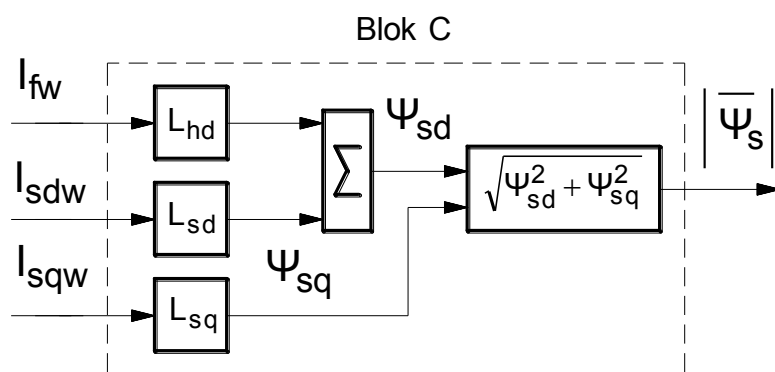
#### Blok II/I ... varianta 2



## 5.2 Blok „výpočet vektoru proudu“



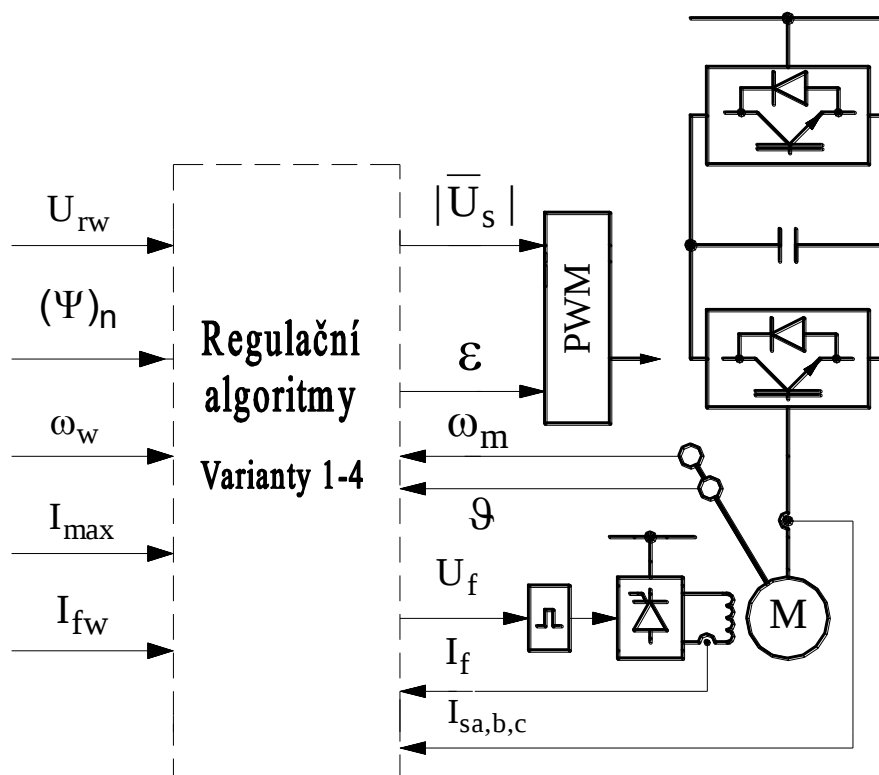
## 5.3 Blok výpočet vektoru magnetického toku statoru



Magnetický tok lze vypočítávat ze skutečných veličin, nebo z veličin požadovaných. Doporučujeme vyhodnocení provádět z veličin požadovaných ( $I_{fw}$ ,  $I_{sdw}$ ,  $I_{sqw}$ ). Omezí se tak zavádění parazitních signálů do regulačních algoritmů.

## 6 Algoritmy řídicích a regulačních obvodů

### 6.1 Strukturní schéma pohonu



|               |                                                   |
|---------------|---------------------------------------------------|
| $U_{rw}$      | Dovolené přemodulování střídače                   |
| $(\Psi)_n$    | Jmenovitý magnetický tok                          |
| $\omega_w$    | Požadovaná úhlová rychlost (otáčky motoru)        |
| $I_{max}$     | Maximální dovolený proud (velikost vektoru)       |
| $I_{fw}$      | Požadovaný budící proud                           |
| $ \bar{U}_s $ | Velikost vektoru napětí                           |
| $\varepsilon$ | Poloha vektoru napětí v souřadném systému statoru |
| $\omega_m$    | Změřená mechanická rychlost (otáčky)              |
| $\theta$      | Poloha rotoru                                     |
| $U_f$         | Napětí budiče                                     |
| $I_f$         | Budící proud                                      |
| $I_{sa,b,c}$  | Změřené proudy statoru                            |

## 6.2 Parametry simulovaných regulátorů

|                                                                                                                                               |                        |                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------------------|
| Zesílení čidel                                                                                                                                | $K_c = 1$              |                               |
| Regulátor otáček                                                                                                                              | $K_{R\omega} = 400$    | $T_{R\omega} = 0.2 \text{ s}$ |
| Varianta 4 : Filtr za regulátorem otáček                                                                                                      | $T_f = 0.05 \text{ s}$ |                               |
| Regulátor $U_{rm}$<br>$U_{rm}$ ... amplituda řídicího signálu střídače<br>(Parametry stejné pro odbuzování prostřednictvím $I_{sd}$ i $I_f$ ) | $K_{RUr} = 150$        | $T_{RUr} = 0.2 \text{ s}$     |
| Regulátory $I_{sd}$ , $I_{sq}$                                                                                                                | $K_{Ri} = 4$           | $T_{Ri} = 0.2 \text{ s}$      |
| Regulátor budicího proudu                                                                                                                     | $K_{Rlb} = 0.03$       | $T_{Ri} = 0.1 \text{ s}$      |
| Budič                                                                                                                                         | $K_b = 20$             |                               |
| Regulátor magnetického toku $ \bar{\Psi}_s $                                                                                                  | $K_{R\psi} = 10$       | $T_{R\psi} = 0.2 \text{ s}$   |

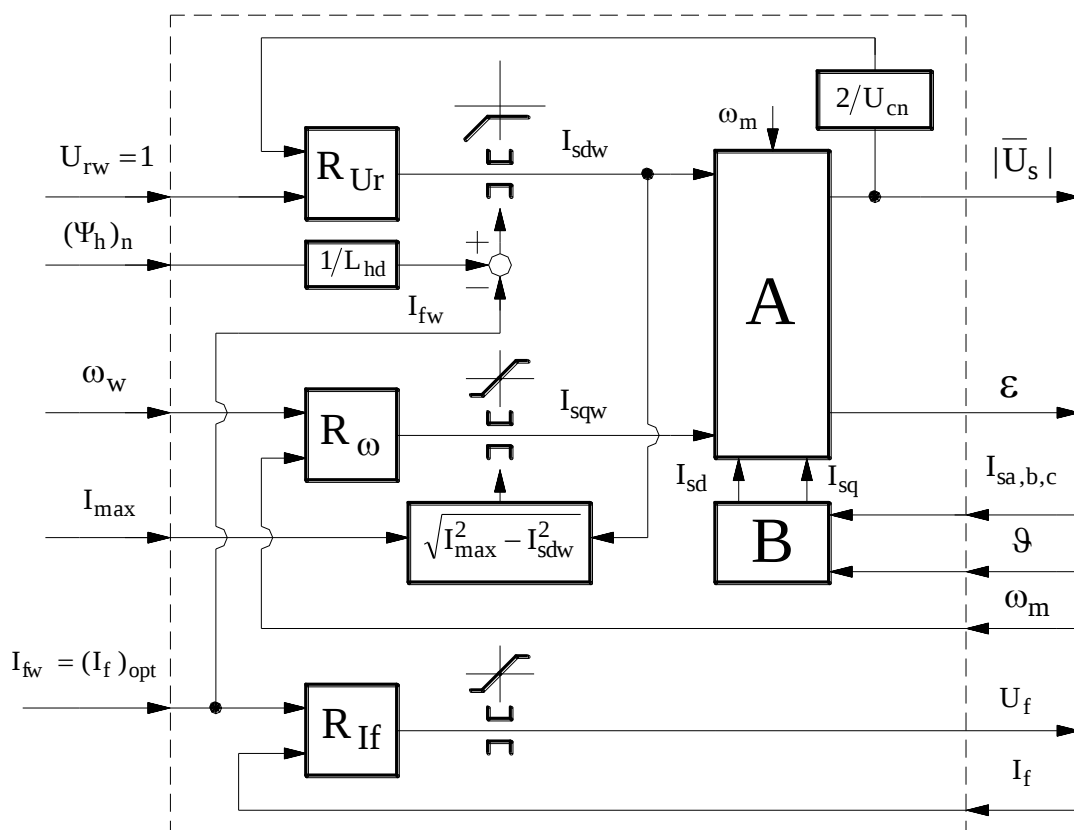
## 6.3 Algoritmy varianty 1

### 6.3.1 Omezován magnetický tok $\Psi_{hd}$

Algoritmy varianty 1 s omezováním  $\Psi_{hd}$  jsou podrobně popsány v [1]. Zde je uvedeno strukturní schéma algoritmů s využitím výše popsaných bloků.

Základní charakteristika:

- Optimální nabuzení (kritérium – maximální moment při jmenovitém proudu)
- Omezování magnetického toku  $\Psi_{hd}$
- Odbuzování (v oblasti vysokých otáček) se realizuje prostřednictvím zvětšování  $|I_{sd}|$ .

Algoritmy varianty 1 – omezení mg. tok  $\Psi_{hd}$ Popis funkce

- Regulátor  $R_{Ur}$  udržuje prostřednictvím změny veličiny  $I_{sdw}$  říditelný střídač. V oblasti menších otáček je omezovač za regulátorem nasycen, zadaný proud  $I_{sd}$  odpovídá požadovanému toku  $\Psi_{hd}$ . V oblasti vyšších otáček je zvětšováním  $|I_{sd}|$  udržován střídač na hranici přemodulování.

- Omezování magnetického toku

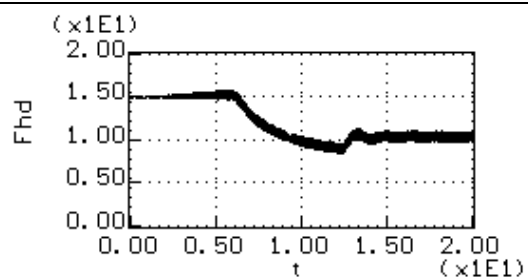
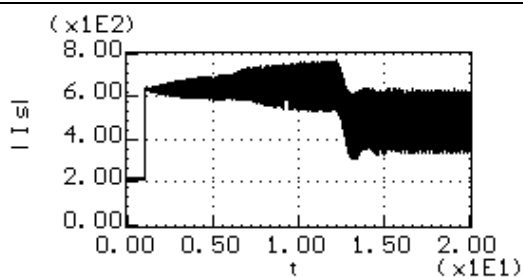
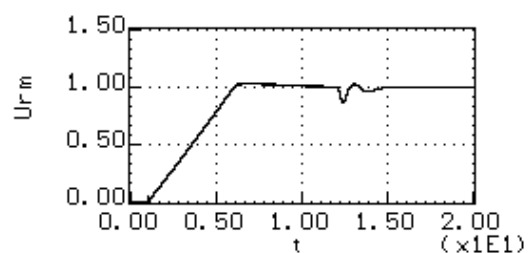
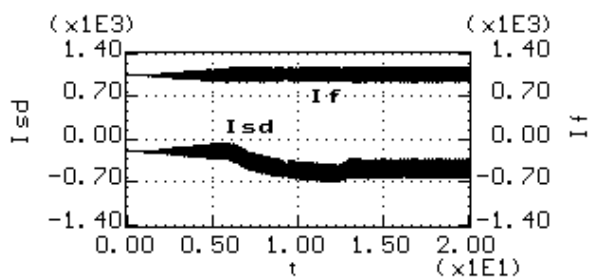
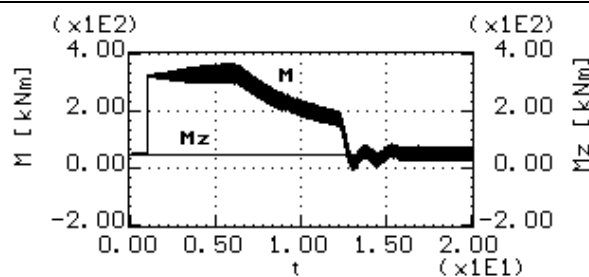
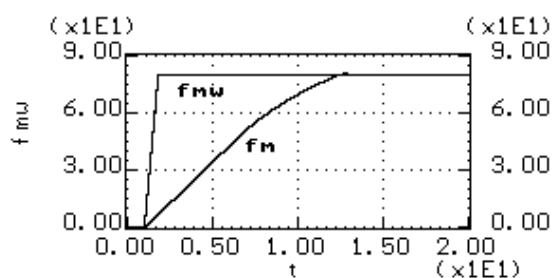
$$\Psi_{hd} = L_{hd} \cdot I_f + L_{hd} \cdot I_{sd} \Rightarrow I_{sd} = 1/L_{hd} \cdot \Psi_{hd} - I_f$$

Pozn.:  $I_{sd} < 0$

- Regulátor otáček  $R_{\omega}$  zadává požadovaný proud  $I_{sq}$ . Ten je omezován tak, aby amplituda proudu statoru byla menší, než zadaný  $I_{max}$ .
- Regulátor budícího proudu zajišťuje optimální nabuzení

V kap. 4.1 je dokázáno, že  $(I_{sw})_{opt}$  je v režimu 1 konstantní. V režimu 2 s rostoucími otáčkami mírně klesá (realizace poklesu není na schématu znázorněna).

**Rozběh s jmenovitým proudem**  
Celkový moment setrvačnosti  $J = 5 \cdot J_m$ ,  $I_{fw} = \text{konst}$

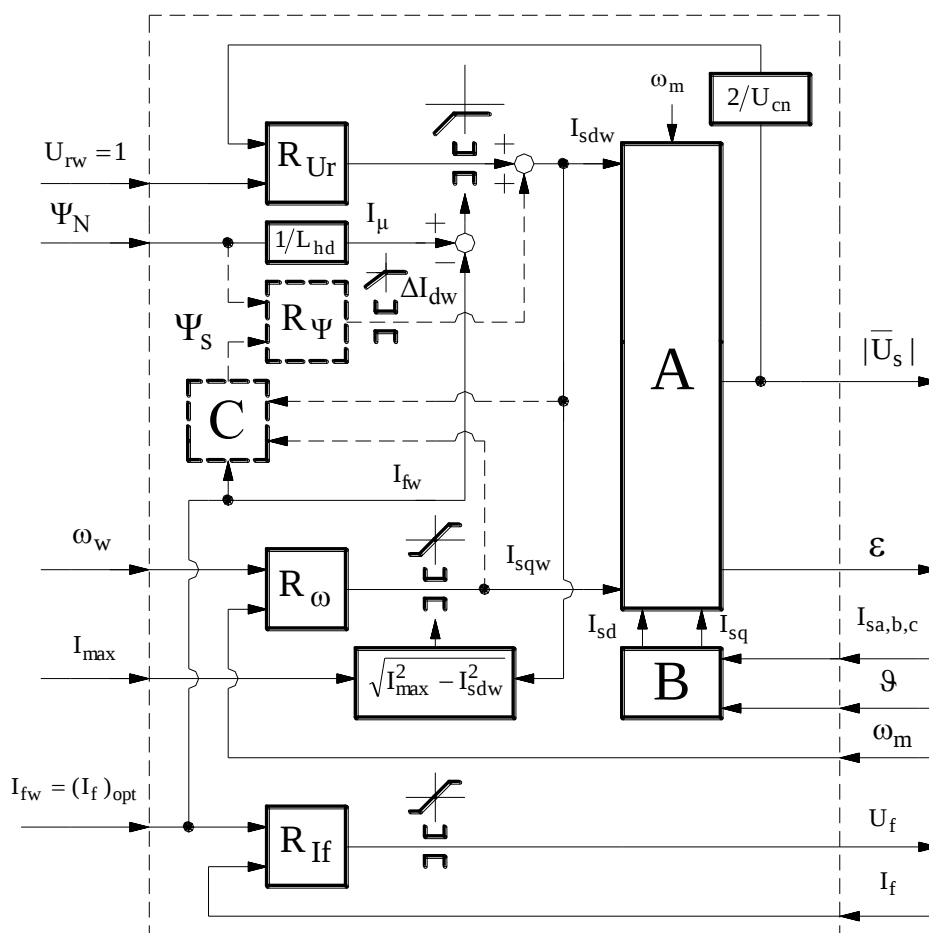


Varianta\_1a

**Závěry:**

Navržené algoritmy zajišťují optimální provoz v režimech 1, 2

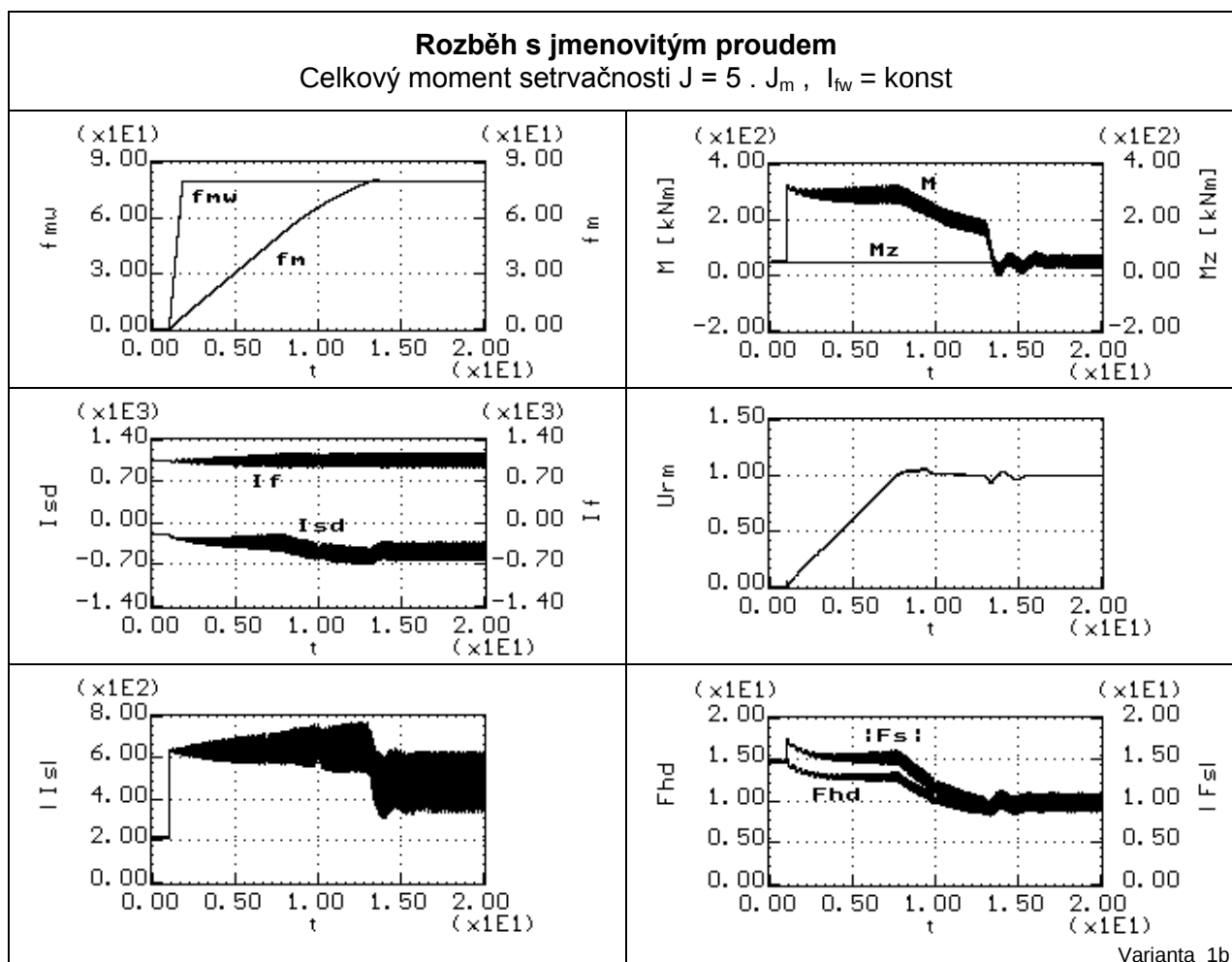
### 6.3.2 Omezován tok $\Psi_s$



Algoritmy varianty 1 – omezován mg. tok  $|\bar{\Psi}_s|$

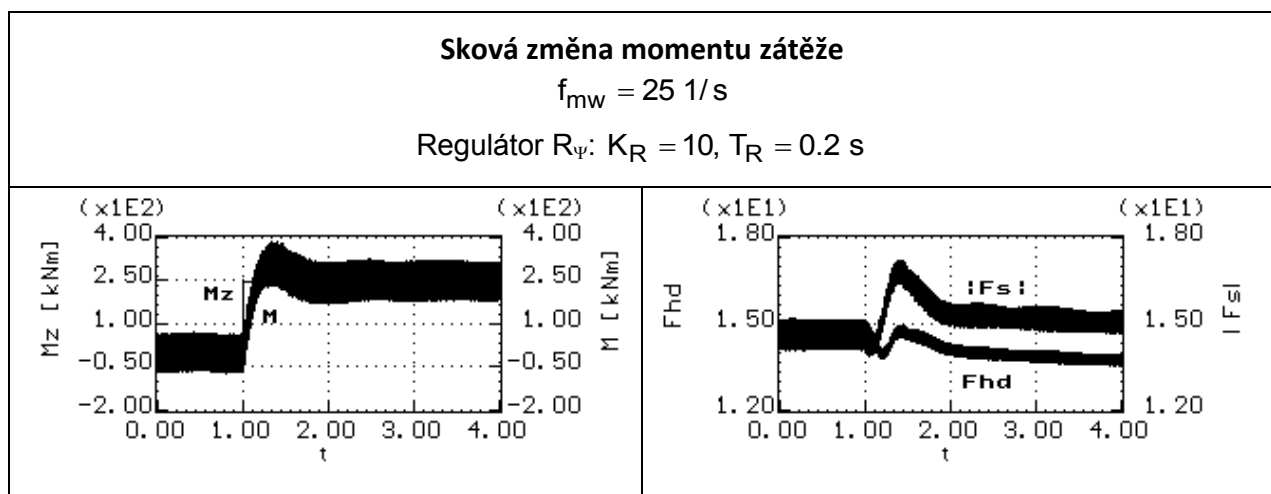
#### Omezování toku $|\bar{\Psi}_s|$

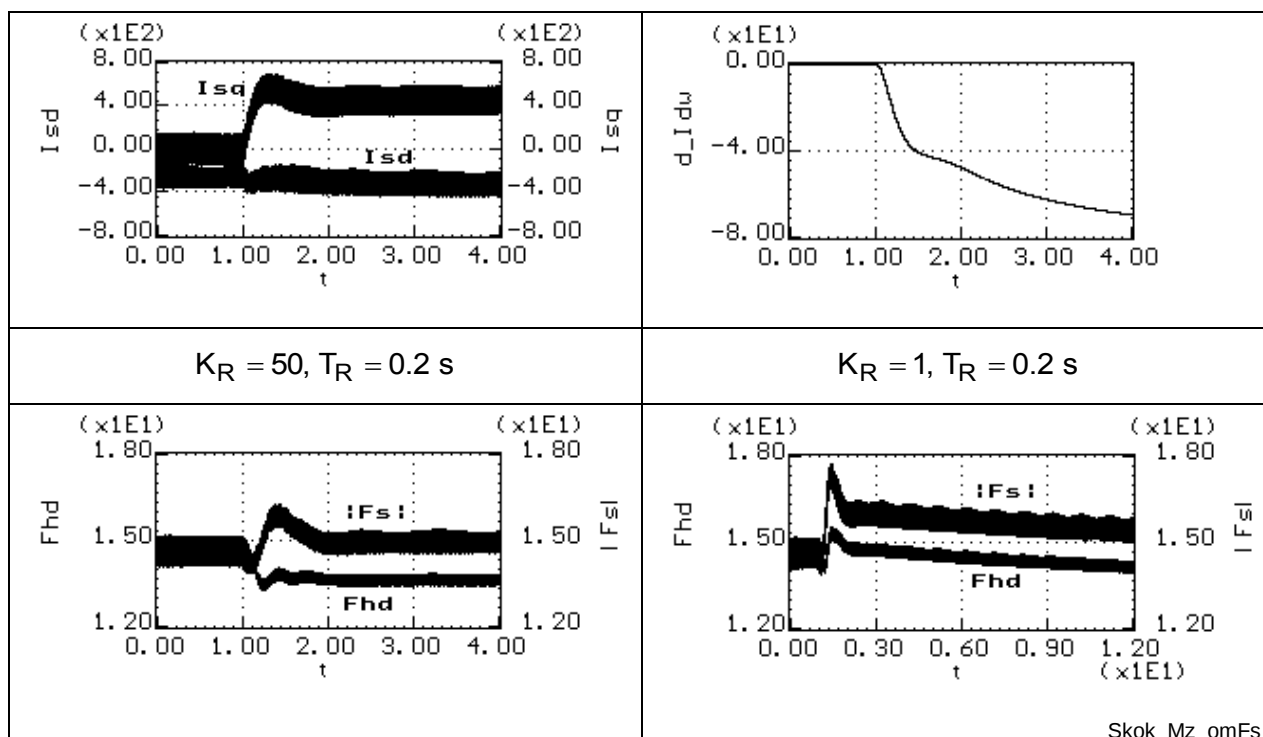
- Omezování toku  $\Psi_{hd}$  je realizováno bez regulátoru ... kap. 6.3.1
- Pro omezování  $\Psi_s$  je nutno do regulačních algoritmů varianty 1 regulátor. Každý další regulátor může zhoršit dynamické vlastnosti pohonu, příp. vyvolat jeho nestabilitu .
- Z výše uvedených důvodů považujeme za výhodné využívat regulátor  $R_\Psi$  pouze pro generování doplňkového signálu  $\Delta I_{dw}$  (regulátor může mít malé zesílení, může být integrační apod.).
- Motor naprázdno ...  $|\bar{\Psi}_s| < \Psi_{hd}$  ... omezovač  $R_\Psi$  je nasycen,  $\Delta I_{dw} = 0$   
(nesymetrický omezovač za regulátorem toku zabraňuje přibuzování motoru naprázdno)
- Motor zatížen ...  $|\bar{\Psi}_s| > \Psi_{hd}$  ... regulátor omezuje  $\Psi_s$ , proto  $\Psi_{sw} \geq \Psi_N \Rightarrow \Delta I_{sdw} < 0$
- Signál  $\Delta I_{sdw}$  (záporný) – zvětšuje  $|I_{sd}|$  (snižuje se mg. tok).



**Závěry:**

- Při rychlých přechodových není funkce regulátoru  $|\bar{\Psi}_s|$  dokonalá.
- Protože je omezování  $|\bar{\Psi}_s|$  navrženo jako doplňková regulace, nemá nedokonalá funkce regulátoru větší negativní účinky.





### Závěr

- Navržené omezování  $|\bar{\Psi}_s|$  je úspěšné
- Je diskutabilní zda je úprava algoritmů, související s omezováním  $|\bar{\Psi}_s|$  smysluplná ... viz kap. 3

## 6.4 Algoritmy varianty 2

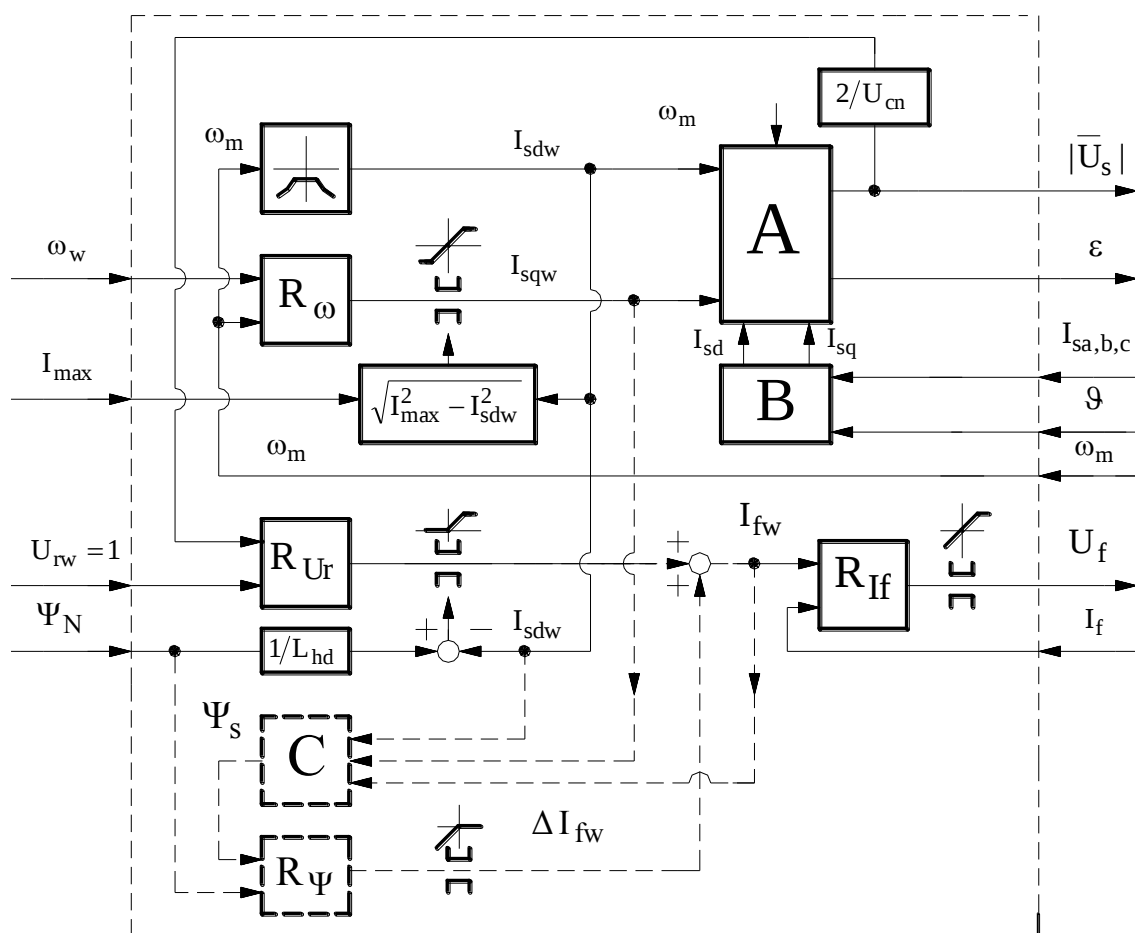
Algoritmy varianty 2 pracují stejně jako algoritmy varianty 1, odbuzování motoru se však realizuje snižováním budícího proudu  $I_f$ .

Odbuzování prostřednictvím budícího proudu je zdánlivě logičtější, má však tyto nevýhody:

- V kap. 4.2 je dokázáno, že  $(I_{sd})_{opt}$  je relativně mnohem více závislé na otáčkách, než  $(I_f)_{opt}$ . Tuto skutečnost je nutno respektovat ...  $I_{sdw}$  je zadáváno v závislosti na otáčkách -  $I_{sdw} = fce(\omega_m)$ ... kap. (4.2)
- Pohon s algoritmy 2 má v náročných přechodových jevech horší dynamické vlastnosti než pohon s algoritmy 1 (byly simulovány jevy, při nichž dochází ke ztrátě říditelnosti střídače)

### Zdůvodnění:

*Při přechodových jevech nedochází k nasycování regulátoru proudu  $I_{sd}$ , ale často nastává nasycování regulátoru budícího proudu. Při nasyceném regulátoru  $I_f$  je regulace budícího proudu nefunkční. To může způsobit zpomalení přechodového jevu*



Algoritmy varianty 2

Omezování mg. toku:

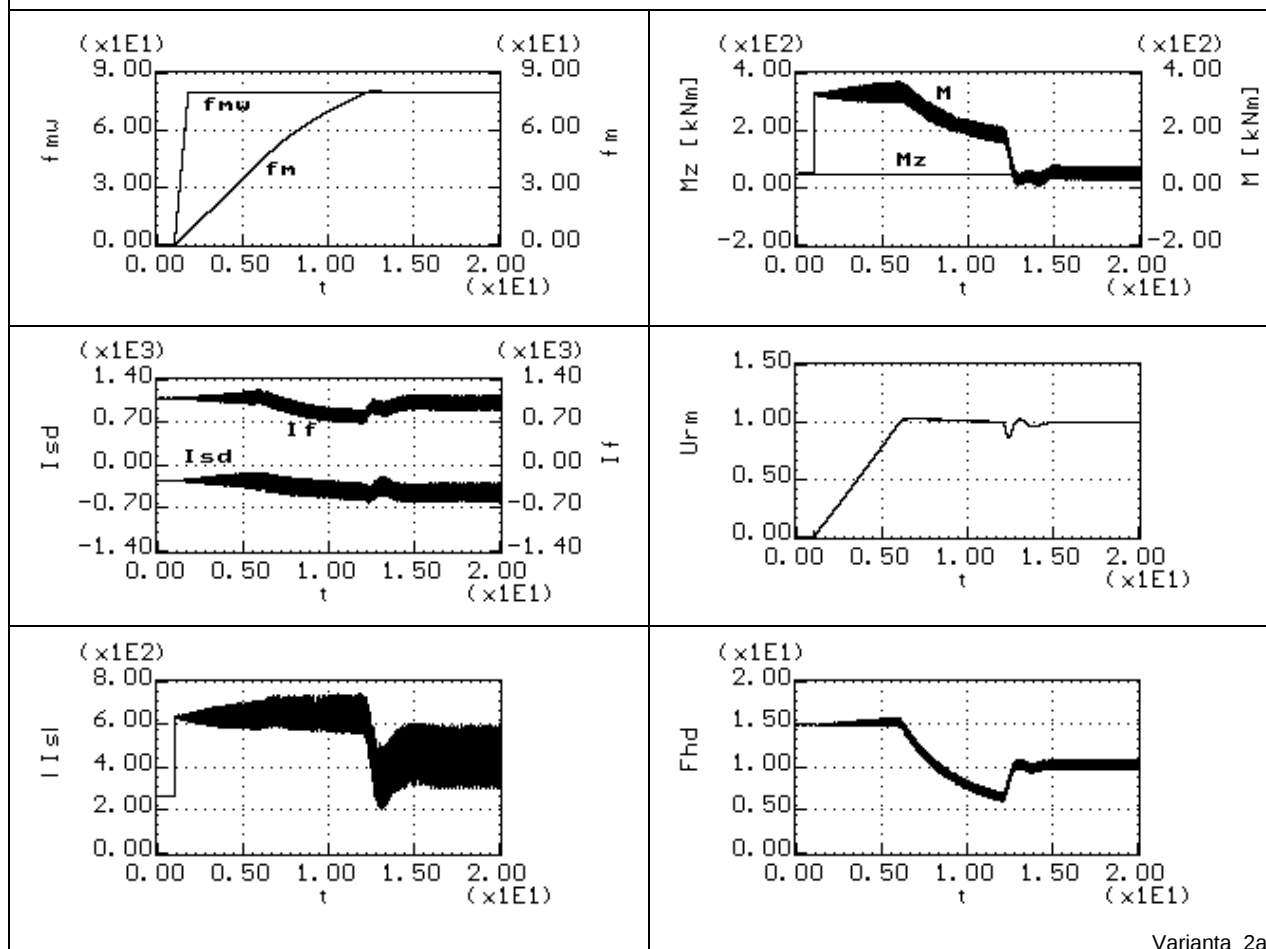
- Omezování  $\Psi_{hd}$  ...  $\Psi_{hd} = L_{hd} \cdot I_f + L_{hd} \cdot I_{sd} \Rightarrow I_f = 1/L_{hd} \cdot \Psi_{hd} - I_{sd}$
- Omezování  $|\bar{\Psi}_s|$  lze realizovat obdobně jako u varianty 1.

Signál  $\Delta I_{fw}$  je záporný (regulátor omezuje tok ...  $\Psi_s \geq \Psi_N$ ), jeho přičtením se sníží  $I_{fw}$ , motor se odbudí.

Nesymetrický omezovač za regulátorem toku zabráňuje přibuzování motoru naprázdno (motor naprázdno ...  $|\bar{\Psi}_s| < \Psi_{hd}$ ).

### Rozběh s jmenovitým proudem

Celkový moment setrvačnosti  $J = 5 \cdot J_m$



Varianta 2a

#### Závěry:

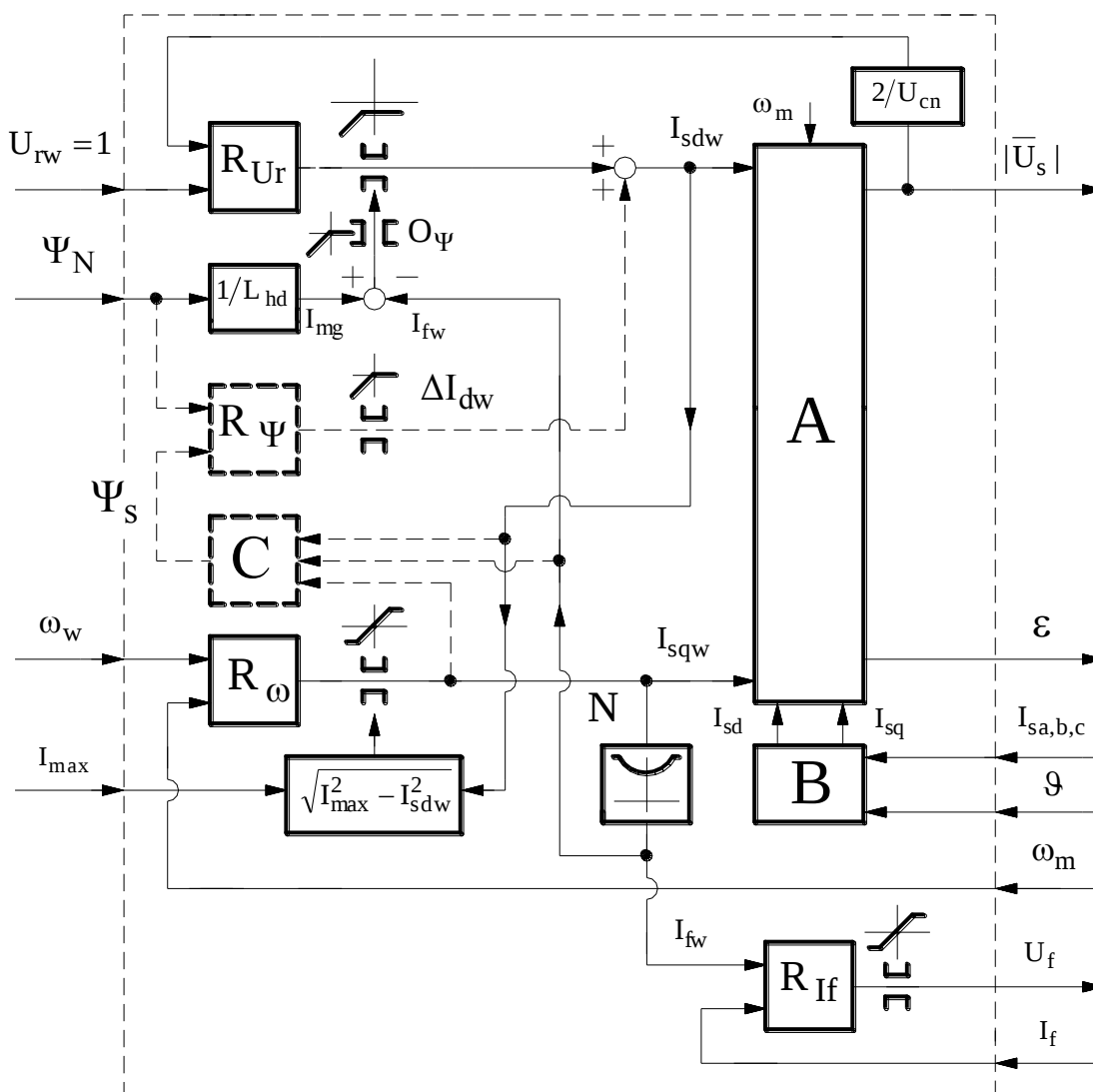
- Vlastnosti pohonu s algoritmy variant 1 i 2 jsou takřka stejné.
- U pohonu s algoritmy varianty 2 vlastnosti pohonu ovlivňuje tvar nelinearity, zadávající  $I_{sdw}$

## 6.5 Algoritmy varianty 3

Algoritmy varianty 3 zajišťují provoz pohonu v režimu 3.

#### Základní charakteristika:

- Optimální nabuzení (kritérium – minimální Jouleovy ztráty)
- Při malých momentech vzniká optimální nabuzení při  $I_{sd} = 0$  ... viz 4.3
- Horší dynamické vlastnosti než varianta 1 ...  $I_{fw} = f_{ce}$  (regulované veličiny  $I_{sqw}$ )



Algoritmy varianty 3, 4

**Odchyly od varianty 1:**

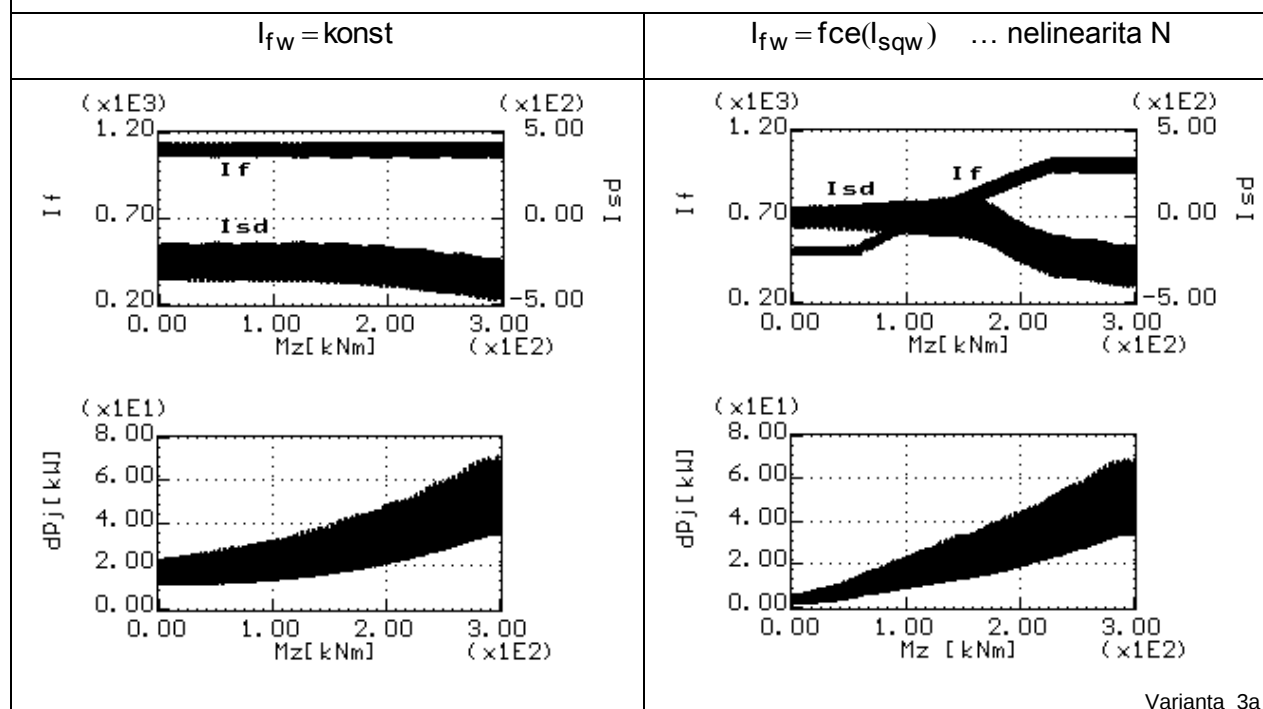
- Požadovaný budící proud  $I_{fw}$  je nelineární funkcí  $I_{sqw}$  ... kap. 4.3
- Algoritmy doplněny o omezovač  $O_\Psi$  s nelineární charakteristikou.

Při malém zadaném momentu (malém  $I_{sqw}$ ) se zadává malé  $I_{fw} \Rightarrow I_{mg} - I_{fw} > 0$ .

Bez omezovače  $O_\Psi$  by se motor proudem  $I_{sd}$  přibuzoval.

## Ztráty motoru v závislosti na momentu

$$f_{mw} = 25 \text{ 1/s}$$

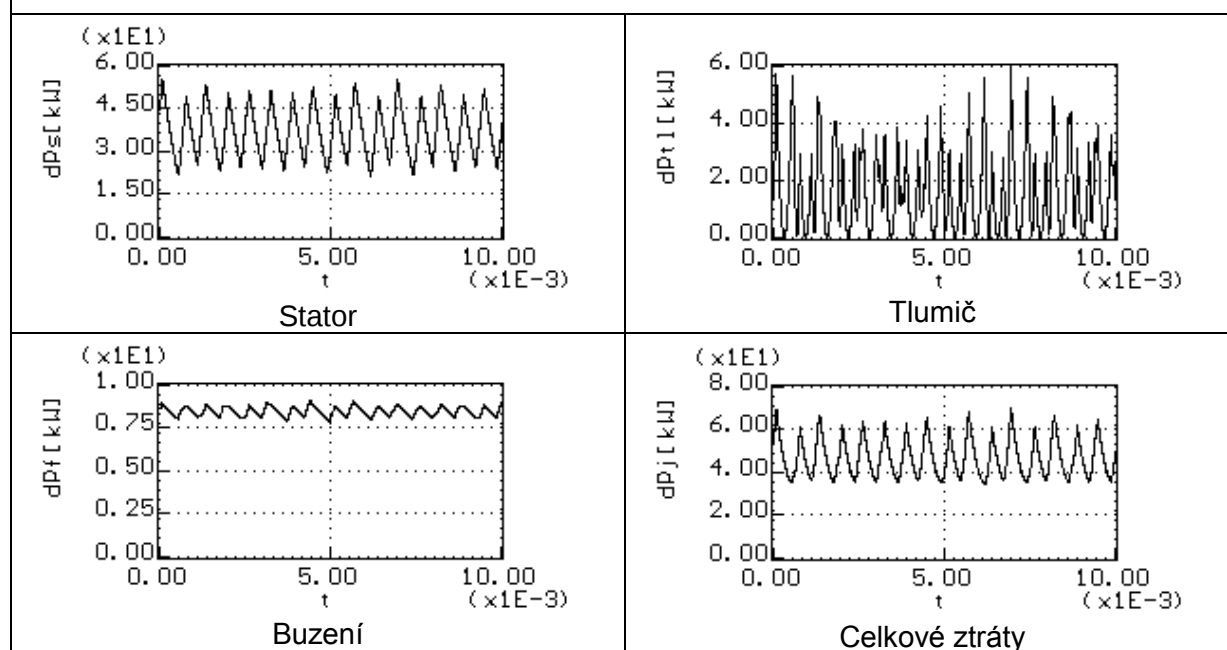


Závěry:

Výhody varianty 3 se uplatňují při malé zátěži

## Rozdělení ztrát

$$M_z = 300 \text{ kNm}, f_{mw} = 25 \text{ 1/s}$$



Závěry:

- Algoritmy varianty 3 zajistí při malém zatížení motoru ...  $I_{sdw} = 0$

- Při vzrůstající zátěži postupně začínají algoritmy 3 pracovat stejně jako algoritmy 1.
- Algoritmy varianty 3 sníží ztráty (oproti variantě 1) pouze v oblasti malých momentů.

## 6.6 Algoritmy varianty 4

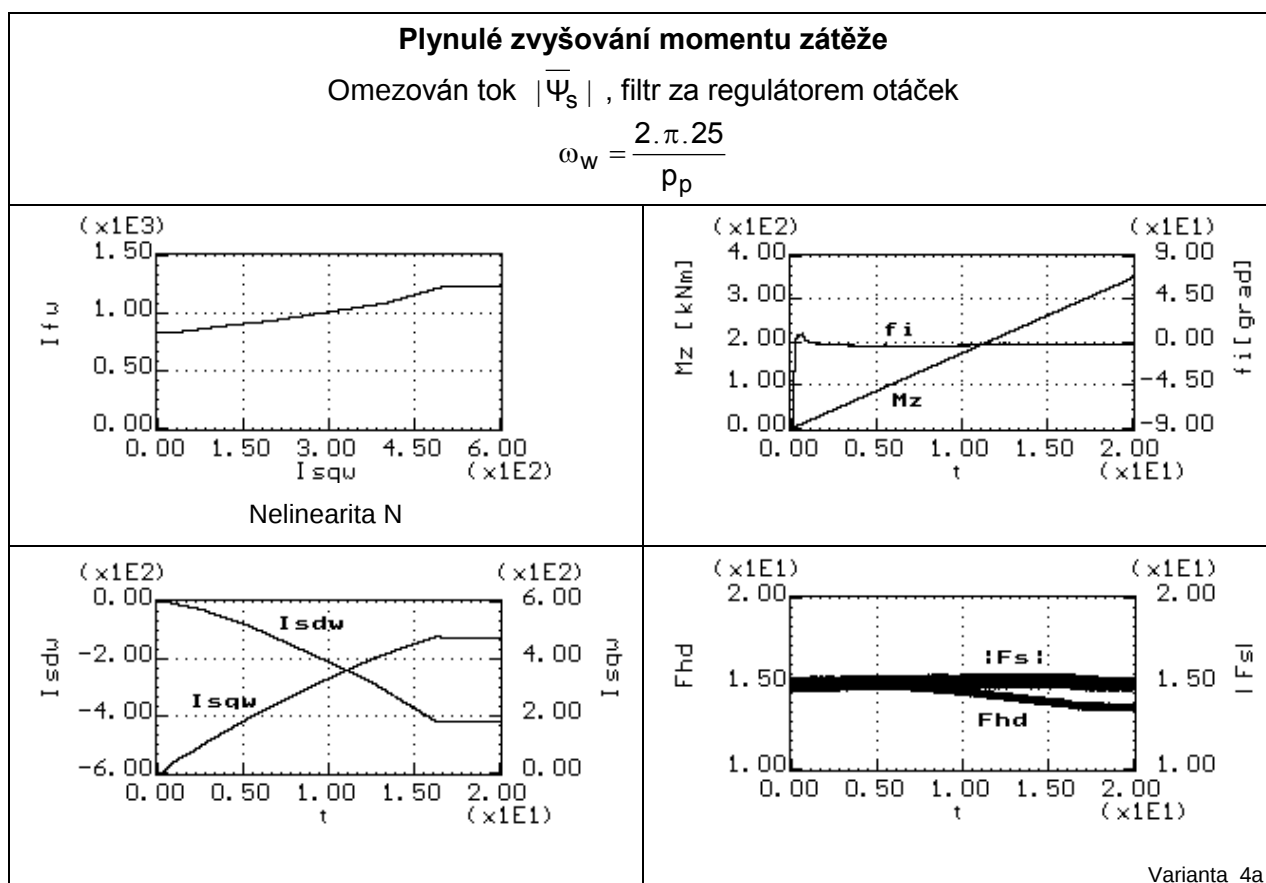
Algoritmy varianty 4 jsou stejné jako algoritmy varianty 3, pouze tvar nelinearity N je odlišný ... viz kap. 4.5

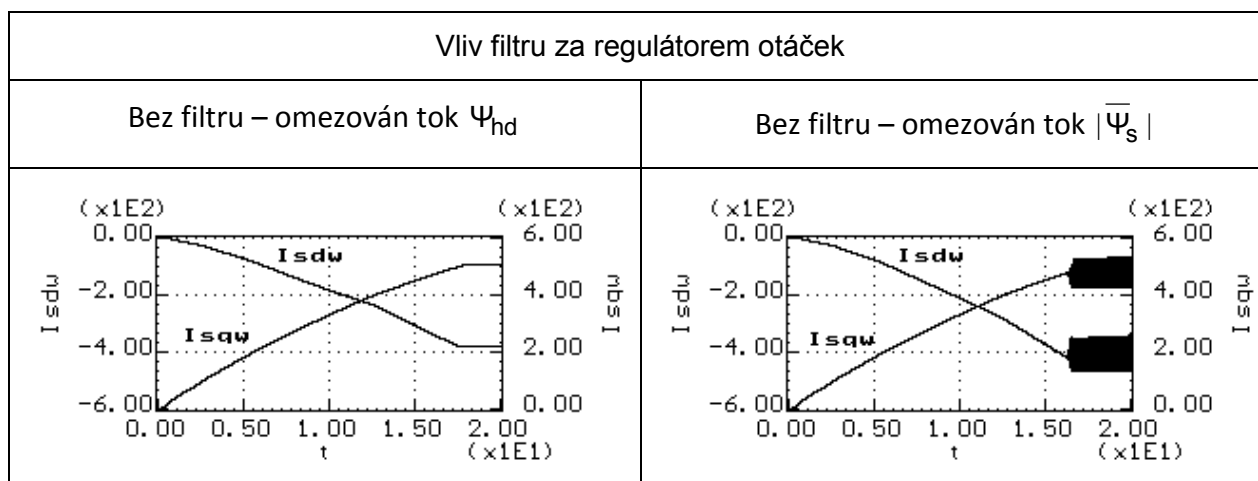
### Odchyly od varianty 1:

- Požadovaný budící proud  $I_{fw}$  je nelineární funkcí  $I_{squ}$  ... kap. 0
- Při omezování toku  $\Psi_{hd}$  další úpravy algoritmů nejsou nutné
- Při omezování toku  $|\bar{\Psi}_s|$  je vhodné zapojit za  $R_\omega$  filtr (stabilita regulovaného systému)

### Odchyly id varianty 3:

- Jiný tvar nelinearity N
- Není využíván omezovač  $O_\psi$  ...  $\varphi = 0 \rightarrow I_{sdw} < 0, |I_{sdw}| \rightarrow 0$



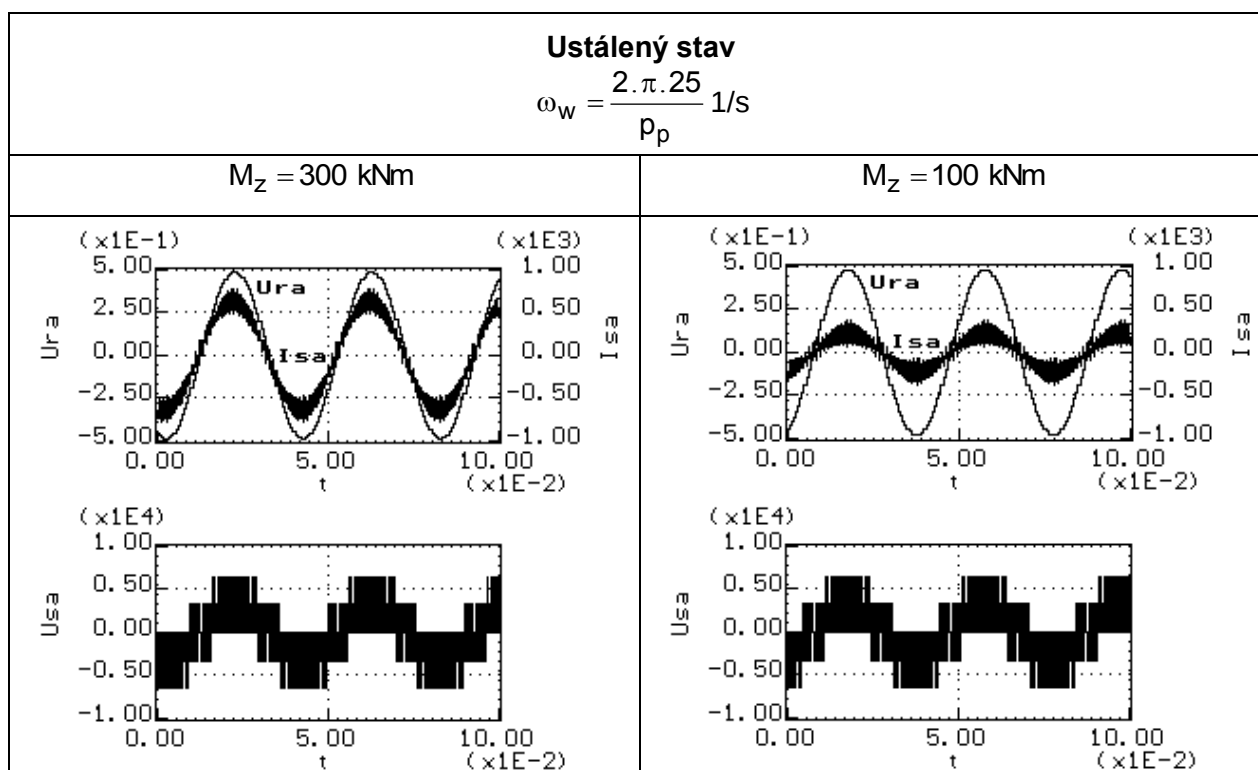


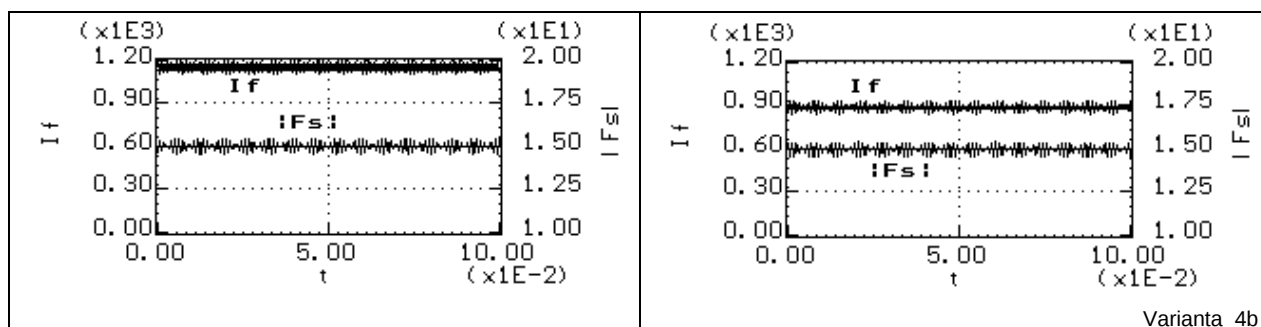
Výpočet  $\phi$  v uvedených grafech:

U nesinusových veličin je  $\phi$  definován jako fázový posun 1. harmonických veličin. Z důvodu jednoduchosti je  $\phi$  vypočítáván z požadovaných složek napětí a proudu.

$$\phi_w = \arctg\left(\frac{-U_{sdw}}{U_{sqw}}\right) - \arctg\left(\frac{-I_{sdw}}{I_{sqw}}\right)$$

Kladná hodnota  $\phi_w$  odpovídá indukční zátěži střídače, záporná kapacitní zátěži.

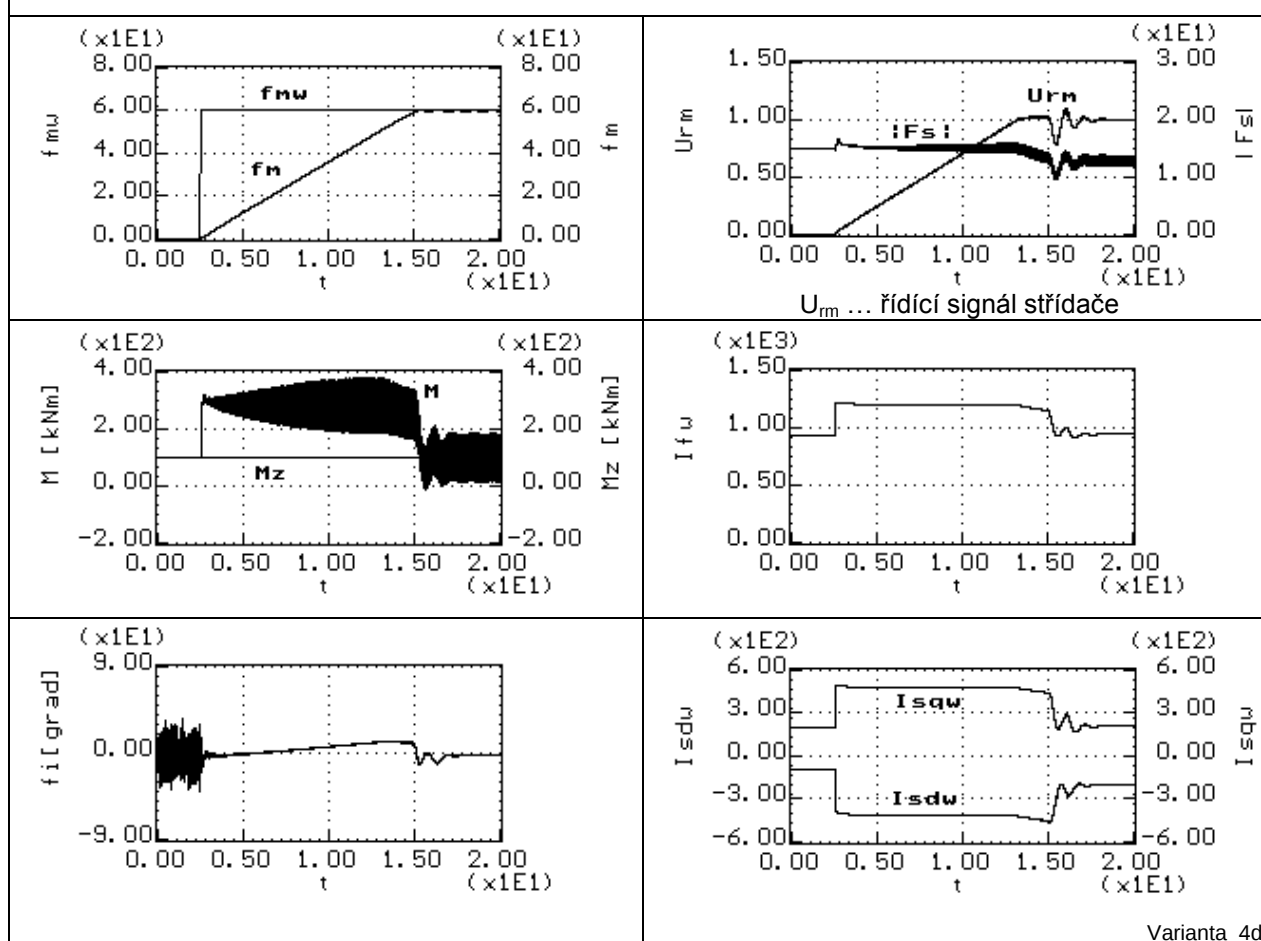




Závěr: Navržené algoritmy zajišťují požadované vlastnosti pohonu

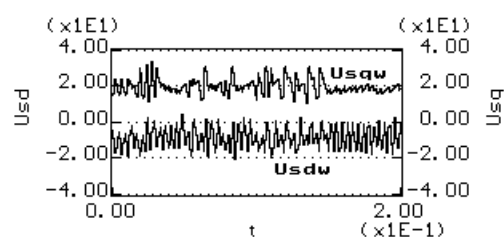
### Přechodový jev po skokové změně $\omega_w$

Celkový moment setrvačnosti  $J = 8 \cdot J_m$



#### Závěry:

- Vyhodnocování  $\phi$  v okolí nulových otáček je problematické



## Literatura

- [1] Zeman, K., Peroutka, Z., Uzel, D.: Regulovaný pohon se synchronním motorem: Návrh algoritmů řízení a regulace.  
Výzkumná zpráva ZČU/RICE č. 22190 - 04 – 2010

## Historie revizí

| Rev. | Kapitola | Popis změny           | Datum<br>Jméno / Odd. |
|------|----------|-----------------------|-----------------------|
| 1    | Všechny  | Publikování dokumentu |                       |
|      |          |                       |                       |
|      |          |                       |                       |
|      |          |                       |                       |
|      |          |                       |                       |
|      |          |                       |                       |
|      |          |                       |                       |
|      |          |                       |                       |
|      |          |                       |                       |
|      |          |                       |                       |
|      |          |                       |                       |
|      |          |                       |                       |
|      |          |                       |                       |