

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Simulace řízení asynchronního motoru**

**vedoucí práce: Ing. David Vošmik**

**2012**

**autor: Radek Lukáš**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2011/2012

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Radek LUKÁŠ**  
Osobní číslo: **E11B0469P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Simulace řízení asynchronního motoru**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište možné způsoby regulace asynchronních motorů a diskutujte jejich vlastnosti.
2. Pro skalární řízení sestavte simulační model. (as. motor napájen z 3f střídače)
3. Proveďte simulaci pro vybrané přechodové děje.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:


1. Zeman, K., Peroutka, Z., Janda, M.: Automatická regulace pohonů s asynchronními motory. Skripta ZČU, Plzeň 2004
2. Vondrášek, F.: Výkonová elektronika-svazek 3. Skripta ZČU, Plzeň 2003

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. David Vošmik**


Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**

Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Prof. Ing. Václav Kús, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

## **Anotace**

Tato bakalářská práce je zaměřena na simulaci skalární řízení asynchronního motoru. V teoretické části je popsáno, co to vlastně je skalární řízení, které prvky jsou potřeba a jak je realizujeme v simulačním programu. Nejvíce nás budou zajímat zapojení s čidlem a bez čidla otáček. Výstupem ze simulačního programu by měli být grafické závislosti důležitých veličin motoru. V závěru práce jsou porovnána jednotlivá zapojení pomocí výsledných grafických závislostí.

## **Klíčová slova**

Momentová charakteristika, moment, zátěžný moment, magnetický indukční tok, statorová frekvence, rotorová frekvence, Trojfázový napěťový střídač, asynchronní motor, otáčky

## **Simulation of induction motor control**

### **Anotation**

This thesis is oriented on the simulation of scalar control of induction motor. In the theoretical part we will explain the term scalar control, which elements are needed and how to implement the simulation program. The most interesting information will be for us the connection with and without sensor of rotations. The output of the simulation program should be the graphical dependences of engine's quantity. Finally we will compare the individual connection using the results of graphical dependences.

### **Key words**

Torque characteristics, torque, reaction torque, magnetic flux, stator frequency, rotor frequency, three-phase voltage inverter, induction motor, speed

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou/ diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 8.6.2012

Jméno příjmení

.....

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Davidu Vošmikovi, za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Dále bych rád poděkoval všem vyučujícím, kteří se podíleli na získávání mých znalostí a v neposlední řadě také rodičům, kteří mě podporovali po stránkách morálních i finančních

## Obsah

Úvod.....	9
Seznam symbolů .....	10
1 Asynchronní motor .....	11
1.1 Momentová charakteristika.....	11
1.2 Způsoby řízení asynchronního motoru .....	11
1.2.1 Řízení otáček skluzem .....	11
1.2.2 Řízení otáček frekvencí .....	12
1.2.3 Řízení otáček změnou počtu pólů .....	12
2 Napěťový střídač.....	12
2.1 Princip trojfázového napěťového střídače .....	12
2.2 Řízení napěťového střídače.....	13
2.3 Šířkově pulzně modulované řízení .....	14
3 Simulační program.....	15
3.1 Skalární řízení .....	15
3.1.1 Princip funkce skalárního řízení bez čidla otáček .....	16
3.1.2 Obvody s omezovačem proudu.....	16
3.1.3 Princip funkce skalárního řízení s čidlem otáček .....	17
3.2 Napěťový střídač – realizace v simulačním programu .....	17
3.3 Asynchronní motor – stavový model motoru .....	18
4 Výsledky simulace .....	20
4.1 Reakce pohonu bez čidla otáček na skokovou změnu frekvence .....	20
4.2 Reakce pohonu bez čidla otáček na změnu statorové frekvence po rampě .....	23
4.3 Pohon s čidlem otáček .....	28
4.3.1 Ladění regulátoru .....	28
4.3.2 Reakce regulátoru na změnu požadovaných otáček .....	32
4.3 Reverzace asynchronního motoru s čidlem otáček.....	34



Závěr .....	37
Seznam literatury a použitých zdrojů .....	38
Seznam příloh .....	1
Přílohy.....	2
Příloha A – zadané a vypočítané parametry motoru.....	2
Příloha B – Simulační program pro obvod bez čidla otáček .....	2
Příloha C – Simulační program pro obvod s čidlem otáček .....	5

## Úvod

Práce je zaměřena na tvorbu simulace skalárního řízení. První kapitola se zabývá momentovou charakteristikou. Popisuje její parametry, jako jsou například moment zvratu, zátěžný moment a nominální moment. Dále jsou zde popsány způsoby řízení asynchronního motoru a jejich vliv na momentovou charakteristiku.

V druhé kapitole je vysvětlen princip trojfázového napěťového střídače, hlavně jeho usměrňovačový a střídačový chod nebo také způsoby řízení výstupního napětí střídače (obdélníkové, obdélníkové šířkové, šířkově pulzní a pulzně šířkově modulované). Při tom nejdůležitější je pro tuto práci pulzně šířkově modulované řízení, protože bude použito v naší simulaci.

Dalším bodem je vysvětlení základního principu skalárního řízení. Týká se hlavně schématického zapojení pohonu s čidlem a bez čidla otáček, ale okrajově i zapojení s omezováním proudu pomocí snižování napětí a zmenšování změny frekvence.

Stěžejní částí práce je tvorba simulačního programu. V simulačním programu jsou použity stavové rovnice, které byly odvozeny ve stojícím systému, který je nejvhodnější pro matematický model pracující v reálném čase.

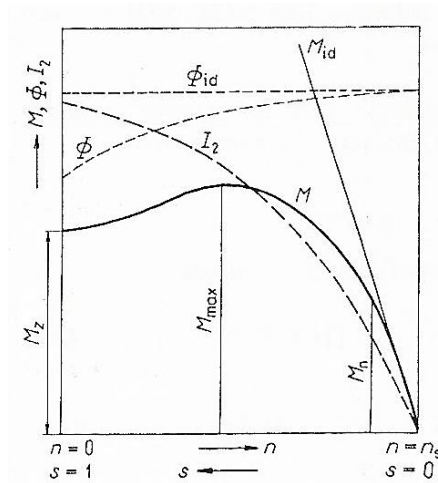
Výsledkem této práce by mělo být potvrzení vlastností skalárního řízení pomocí grafických průběhů, reakce zapojení pohonu bez čidla otáček na skokovou změnu statorové frekvence a změnu statorové frekvence po rampě. Dále pak odezva zapojení pohonu s čidlem otáček na skokovou změnu požadovaných otáček nebo také reverzaci otáček.

## Seznam symbolů

$U_d$	napětí meziobvodu
$I_d$	proud meziobvodu
$M$	mechanický moment motoru
$B$	indukce
$\Phi$	magnetický indukční tok
$s$	skluz
$R_r, R_s$	rotorový a statorový odpor
$f_s, f_r$	rotorová a statorová frekvence
$n$	Otáčky
$p$	počet pól párů
$P$	činný výkon
$U_{rm}$	amplituda nosného signálu
$U_{pm}$	amplituda modulačního signálu
$u_{z1}$	napětí na zátěži
$u_{sx}, u_{sy}$	vektor napětí v x-ové a y-ové složce
$J$	moment setrvačnosti
$M_z$	moment zátěže

# 1 Asynchronní motor

## 1.1 Momentová charakteristika



Momentová charakteristika je velmi důležitá pro posouzení vlastností motoru. Jedná se o grafickou závislost momentu na otáčkách, či skluzu. Točivý moment odpovídá mechanickému výkonu:

$$M = \frac{P}{\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}} \quad (1.1)$$

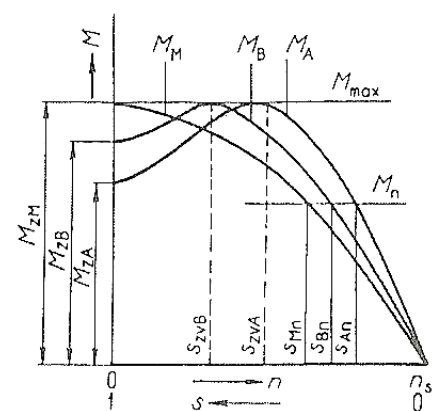
$n$  jsou skutečné otáčky rotoru  $n = n_s \cdot (1 - s)$ ,  $n_s$  – synchronní otáčky a  $s$  – skluz [1]

Obr. 1.1 Momentová charakteristika asynchronního motoru [převzato z 1]

Moment je závislý na obvodové tažné síle hřídele  $F = B \cdot I \cdot l$ , kde  $I$  je rotorový proud a  $B$  magnetická indukce přímo úměrná magnetickému toku  $\Phi$ . Pokud zanedbáme rozptyl okolo vinutí, dostaneme konstantní magnetický indukční tok a rotorový proud přímo úměrný skluzu. Moment by odpovídal přímce  $M_{id}$ . Ve skutečnosti však rozptyl není nulový a tak magnetický indukční tok i rotorový proud závisí na skluzu. K momentu zvratu  $M_{max}$  dochází při nejvyšší hodnotě součinu magnetického indukčního toku a proudu rotoru.  $M_Z$  je záběrný moment při nulových otáčkách ( $s=1$ ). [1]

## 1.2 Způsoby řízení asynchronního motoru

### 1.2.1 Řízení otáček skluzem



Obr. 1.2 Momentová charakteristika při změně rotorového odporu [převzato z 1]

Otáčky asynchronního kroužkového motoru se zvyšováním odporu v rotoru snižují. Toto řízení je velmi nevhodné. Potřebný odpor pro zmenšení otáček  $R_r$  se získá ze vztahu:

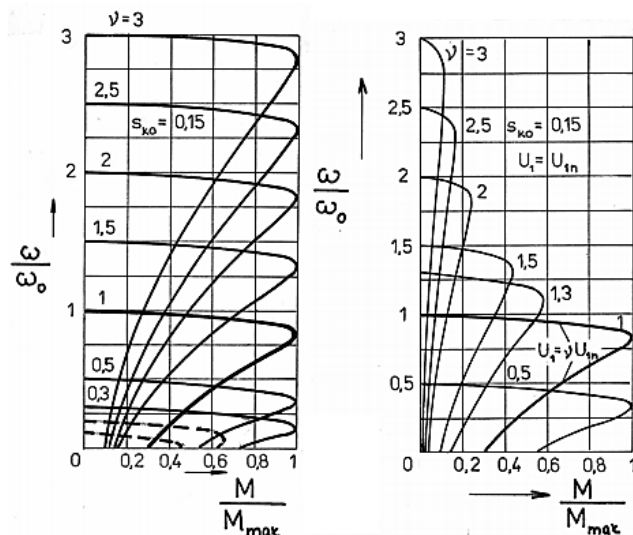
$$\frac{s_n}{s_r} = \frac{R_2}{R_2 + R_r} = \frac{n_s - n_n}{n_s - n_r} \quad (1.2)$$

$s_n$  – skluz při jmenovitých otáčkách,  $s_r$  – skluz potřebný ke snížení otáček,  $R_2$  – rotorový odpor [1]

### 1.2.2 Řízení otáček frekvencí

Samotné řízení frekvence by vedlo při konstantním napětí při poklesu frekvence k nárůstu magnetického indukčního toku a následně i k nárůstu magnetizačního proudu. Pokud bychom frekvenci zvyšovali, došlo by k poklesu magnetického indukčního toku a motor by se tak odbuzoval. Magnetický obvod by nebyl plně využit. Z tohoto důvodu se kromě frekvence reguluje i napětí tak, abychom dosáhli konstantního magnetického indukčního toku

( $U/f = \text{konstanta}$ ). Na obrázku 1.3



vlevo je zobrazeno skalární řízení s konstantním magnetickým indukčním tokem. Na obrázku vpravo je zobrazeno skalární řízení s konstantním magnetickým indukčním tokem pouze do hodnoty jmenovitých otáček, poté je napětí konstantní a dochází k poklesu magnetického indukčního toku. [2]

Obr. 1.3 Momentové charakteristiky asynchronního motoru při frekvenčním řízení [převzato z 2]

### 1.2.3 Řízení otáček změnou počtu pólů

Jedná se o skokovou změnu otáček a řídicí veličinou je zde počet pól párů. Změna počtu pólů se provádí přepínáním vinutí. Výsledná rychlost otáček: [1]

$$n = \frac{60 \cdot f_s \cdot (1-s)}{p} \quad (1.3)$$

## 2 Napěťový střídač

### 2.1 Princip trojfázového napěťového střídače

Napěťový střídač je na svém vstupu napájen stejnosměrným napětím, které je získáno ze zdroje stejnosměrného napětí nebo usměrňovačem. Napěťový střídač umožňuje střídačový i usměrňovačový chod. Střídačový chod je zajištěn pomocí vypínatelných součástek (tranzistorů, vypínatelných tyristorů). Usměrňovačový chod je zajištěn zpětnými diodami, která zároveň zajišťují při střídačovém chodu průchod jalového výkonu. Na vstupu

napětíového střídače je konstantní napájecí napětí zdroje  $U_d$ . Ze zdroje je zároveň odebrán proud  $I_d$ . Výsledný výkon odebráný ze zdroje se spočítá následovně  $P = U_d \cdot I_d$ . Z tohoto vztahu vyplývá, že pokud je napětí  $U_d$  konstantní pak se musí se smyslem přenosu středního výkonu měnit smysl proudu  $I_d$ . Pokud je střední hodnota výkonu větší než nula, pak proud  $I_d$  musí být taktéž kladný. Při těchto podmínkách dochází ke střídačovému chodu. Pokud je však střední hodnota výkonu menší než nula, pak proud  $I_d$  je záporný a dochází k usměrňovačovému chodu. [3]

$$P > 0 \Rightarrow I_d > 0 \dots \text{střídačový chod}$$

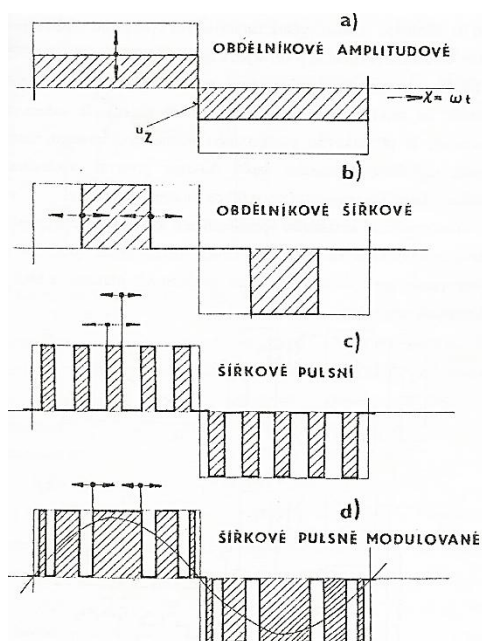
$$P < 0 \Rightarrow I_d < 0 \dots \text{usměrňovačový chod}$$

Okamžitá hodnota výkonu se spočítá podle vztahu:

$$p = U_d \cdot i_d = \sum_{n=1}^m p_n \quad (2.1)$$

Kde  $p_n$  je okamžitá hodnota výkonu odebráného jednou fází,  $m$  je celkový počet fází a  $i_d$  okamžitá hodnota odebráného proudu. Při odběru jalového výkonu zátěží u jednofázového můstkového zapojení střídače k periodickým změnám smyslu proudu  $i_d$ . U více fázového zapojení dochází běžně ke zvlnění proudu  $i_d$  a však periodické změny jeho smyslu nejsou úplně vyloučeny. [3]

## 2.2 Řízení napětíového střídače



Obr. 2.1 Způsoby řízení výstupních napětí střídačů [převzato z 3]

Řízení napětíového střídače – Napětíový střídač umožňuje společně s řízením kmitočtu i regulaci napětí. U některých řízení je regulace napětí dokonce nezbytná, například pokud chceme udržet při regulaci otáček konstantní magnetický indukční tok, musíme zachovat konstantní poměr mezi napětím a kmitočtem. Existuje několik způsobů řízení napětí pomocí napětíového střídače:

1. Obdélníkové amplitudové – kde dochází ke změně amplitudy napětí, šířka pulzu však zůstává stejná
2. Obdélníkové šířkové – kde zůstává konstantní amplituda a mění se šířka pulzu

3. Šířkově pulzní – amplituda je konstantní, pulzů je několik a mají stejnou šířku
4. Šířkově pulzně modulované [3]

Nejpoužívanějšími metodami jsou šířkově pulzně modulované řízení a šířkově pulzní řízení, z důvodu lepší skladby vyšších harmonických napětí a proudu. Maximální hodnoty napětí u těchto se řízení se dosáhne přechodem na obdélníkové řízení. Obdélníkové řízení se používá zpravidla jen u méně náročných aplikací, kterým postačuje konstantní hodnota výstupního napětí střídače. Při použití obdélníkového řízení k napájení střídavého motoru dochází vlivem vyšších harmonických k pulzaci momentu motoru. Při vyšších kmitočtech se tato skutečnost zanedbává, ale při nižší frekvenci by mohlo dojít i k havárii, pokud by se vyrovnal kmitočet střídavé složky momentu s mechanickými kmity. [3]

### 2.3 Šířkově pulzně modulované řízení

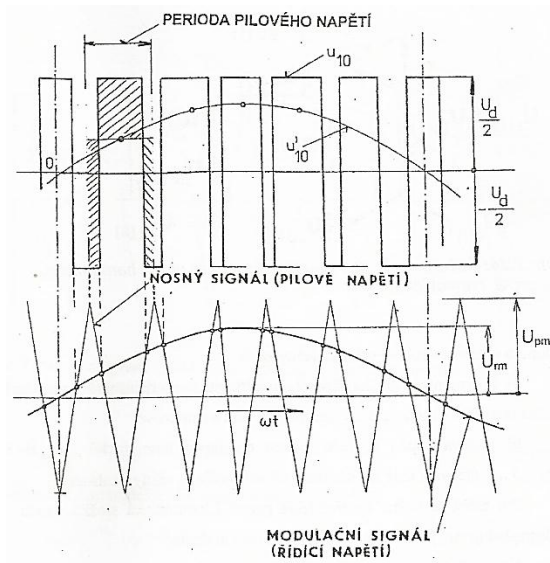
Jedná se o nejpoužívanější řízení, vzhledem k obsahu vyšších harmonických, což vede ke snížení obsahu střídavé složky mechanického momentu. Tato metoda se postupem času vyvinula z pulzně šířkové modulace. Jedná se o její úpravu, tím způsobem, že pulzy jsou v průběhu času proměnné. [3]

Druhy šířkové pulzní modulace:

1. Analogová – jedná se o nejstarší metodu řešení šířkové pulzní modulace
2. Digitální:
  - a) Digitální napodobení analogové šířkové pulzní modulace – jedná se o metodu vycházející z analogové modulace, realizovanou však za pomoci mikroprocesorové techniky
  - b) Šířková pulzní modulace na základě vylučování vyšších harmonických
  - c) Šířková pulzní modulace vycházející z vektorového zobrazování veličin

Všechny tyto způsoby jsou pouze různými cestami k dosažení stejného cíle. O kvalitě modulace nevypovídá použitý způsob, ale četnost sepnutí použitých součástek, při stejných výstupních parametrech střídače. [3]

Analogová metoda a též její digitální napodobení je založena na principu koincidence (rovnosti), kdy porovnáváme nosný a modulační signál. Pokud dojde ke koincidenci těchto dvou signálů, přechází spínací impuls ze součástek v první větvi na součástky ve větvi čtvrté. Napětí  $u_{10}$  se mění právě v závislosti na sepnutých součástkách na  $+U_d/2$  nebo  $-U_d/2$ . Změna výstupních parametrů střídače jako je frekvence nebo amplituda napětí se provádí změnou



Obr. 2.2 Princip koincidence [převzato z 3]

frekvence nebo amplitudy modulačního signálu. Dalším důležitým parametrem je hloubka modulačního signálu  $M=U_{rm}/U_{pm}$ , kde  $U_{rm}$  je amplituda nosného signálu a  $U_{pm}$  je amplituda modulačního signálu. [3]

## 3 Simulační program

### 3.1 Skalární řízení

Skalární řízení je založeno na podmínce, že magnetický indukční tok statoru je konstantní, pokud je frekvence menší než jmenovitá. Čehož se dosáhne vhodným nastavením indukovaného napětí. Z náhradního schématu asynchronního motoru vyplývá, že efektivní hodnota napětí statoru se spočítá:

$$\bar{U}_s = R_s \cdot I_s + j \cdot \omega_s \cdot \Psi_s = \Delta \bar{U}_R + \bar{U}_{ind} \quad (3.1)$$

Při konstantním  $\bar{\Psi}_s$  se indukované napětí  $\bar{U}_{ind}$  spočítá následovně:

$$|\bar{U}_{ind}| = |\bar{\Psi}_s| \cdot \omega_s = K_U \cdot f_s \quad (3.2)$$

$$K_U = \frac{\bar{U}_{sN} \cdot \sqrt{2}}{f_{sN}} \quad (3.3)$$

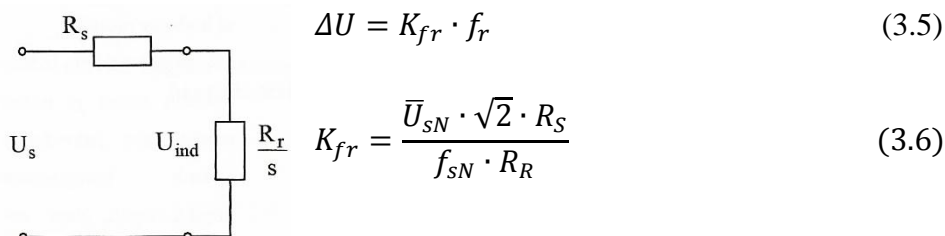
Výsledné satorové napětí se spočítá jako součet indukovaného napětí a úbytku napětí na statoru:

$$|\bar{U}_s| = |\bar{U}_{ind}| + \Delta U \quad (3.4)$$

Úbytek napětí  $\Delta U$  se vyhodnocuje ze statorového proudu, statorové frekvence a rotorové frekvence. Vyhodnocování  $\Delta U$  ze statorového proudu se příliš nepoužívá, z důvodu jeho



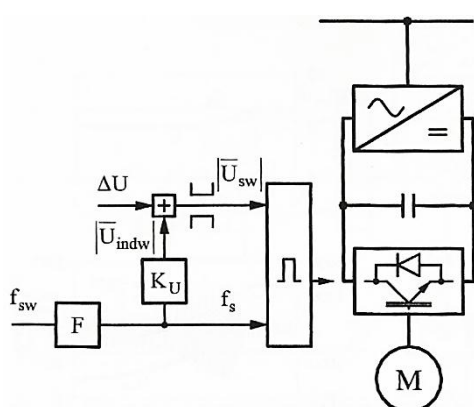
složitosti. U výpočtu  $\Delta U$  ze statorové frekvence je  $\Delta U$  maximální při nulové frekvenci, abychom dosáhli rozběhu motoru a naopak při jmenovité frekvenci je  $\Delta U$  nulové, protože průmět vektoru  $\Delta \bar{U}_R$  do směru  $\bar{U}_{ind}$  je nulový. Pokud je  $\Delta U$  funkcí rotorové frekvence, odvodíme jeho hodnotu ze zjednodušeného náhradního schématu asynchronního motoru na obr 3.1. [4]



Obr 3.1 Náhradní schéma asynchronního motoru [převzato z 4]

Kromě úbytku napětí na statoru dochází také k úbytkům napětí na polovodičových součástkách střídačů. Kompenzace se provádí pomocí řídicích obvodů, zvýšením napětí. [4]

### 3.1.1 Princip funkce skalárního řízení bez čidla otáček



Obr 4.2 Schéma pohonu bez čidla otáček [převzato z 4]

Nejjednodušší realizace skalárního řízení je zobrazena na předcházejícím obrázku. Blok F zajišťuje, aby po skokové změně požadované frekvence  $f_{sw}$  došlo k pomalému nárůstu  $f_s$  právě až na požadovanou hodnotu. Pokud se však na vstup střídače přivede skokovou změnu  $f_s$ , tak by došlo k prudkému nárůstu proudu. Na napěťovém vstupu střídače prochází signál přes omezovač, který je uveden do činnosti pouze, pokud je  $U_s > U_{sN}$  – napětí na výstupu omezovače bude konstantní a dojde k odbuzení

motoru. Při  $f_s < f_{sN}$  se napětí mění tak, abychom udrželi konstantní magnetický indukční tok. Toto zapojení může být ještě doplněno obvody pro omezování proudu, například omezování proudu omezováním napětí střídače nebo zmenšováním změny frekvence. [4]

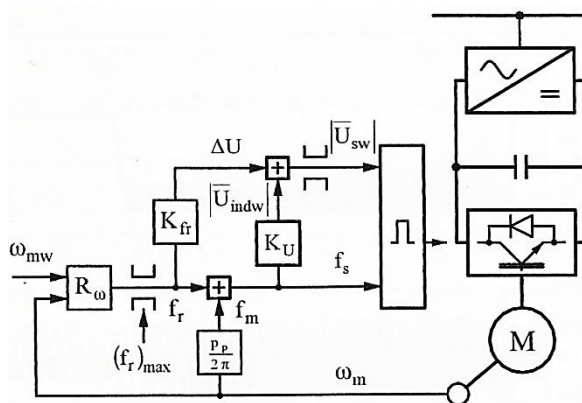
### 3.1.2 Obvody s omezovačem proudu

Obvody s omezováním proudu napětím využívají regulátoru proudu. Je-li proud ze zpětné vazby menší než požadovaný maximální proud, je napětí omezováno jmenovitou hodnotou napětí. V opačném případě je napětí snižováno tak, aby proud poklesl na požadovanou hodnotu. U regulátoru proudu si musíme dávat pozor, aby neměl příliš velké zesílení,

způsobující sice rychlé ustálení požadovaného proudu, ale zároveň také vznik proudových špiček. [4]

Omezení proudu zmenšováním rychlosti změny kmitočtu se opět provádí pomocí regulátoru proudu, avšak akční veličinou je zde frekvence. Při malých proudech je změna frekvence maximální a naopak při velkých proudech je změna kmitočtu zmenšována. [4]

### 3.1.3 Princip funkce skalárního řízení s čidlem otáček



Obr 3.3 Schéma pohonu s čidlem otáček [4]

Pomocí čidla otáček odečítáme  $\omega_m$ , která vstupuje do regulátoru a porovnává se s požadovanými otáčkami  $\omega_{mw}$ . Výstupem z regulátoru je rotorová frekvence  $f_r$ , která je úměrná v ustáleném stavu momentu motoru. Na výstupu z regulátoru je umístěn omezovač rotorové frekvence  $f_r$ , který nám zajišťuje nízké hodnoty skluzu a zabraňuje přetížení motru. [4]

Výsledná statorová frekvence se spočítá:

$$f_s = f_r + f_m \quad (3.7)$$

Kde  $f_m$  se získá z úhlových otáček rotoru:

$$f_m = \frac{p_p \cdot \omega_m}{2 \cdot \pi} \quad (3.8)$$

### 3.2 Napěťový střídač – realizace v simulačním programu

Trojfázový napěťový střídač jsme realizovali tak, že jsme si vygenerovali symetrickou pilu. Dále jsme si generovali v programu sinusové průběhy jednotlivých fázových napětí, které jsme pak porovnávali s průběhem pily. Pokud napětí pily je menší než napětí fázové, pak na výstupu střídače bude napětí  $u_{10}$  rovno  $U_c/2$ , pokud bude napětí rovno  $-U_c/2$ . Takto postupujeme u všech tří fází. Napětí zátěže pak spočítáme:

$$u_{z1} = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot u_{10} - u_{20} - u_{30}) \quad (3.9)$$

$$u_{z2} = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot u_{20} - u_{10} - u_{30}) \quad (3.10)$$

$$u_{z3} = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot u_{30} - u_{10} - u_{20}) \quad (3.11)$$

[3]

Tato napětí dále rozložíme do jediného prostorového vektoru:

$$u_{sx} = k \cdot [u_{z1} - 0,5 \cdot (u_{z2} + u_{z3})] = \frac{2}{3} \cdot u_{z1} - \frac{(u_{z2} + u_{z3})}{3} \quad (3.12)$$

$$u_{sy} = k \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (u_{z2} - u_{z3}) = \frac{(u_{z2} - u_{z3})}{\sqrt{3}} \quad (3.13)$$

$k$  je činitel transformace a je v našem případě roven  $2/3$ . [4]

### 3.3 Asynchronní motor – stavový model motoru

K tomu, abychom získali stavový model motoru, potřebujeme stavové rovnice. Pro zjednodušení jejich tvaru jsou stavové rovnice odvozeny ve stojícím systému. [4]

$$\bar{u}_s = R_r \cdot \bar{i}_s + \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} \quad (3.14)$$

$$0 = R_r \cdot \bar{i}_r + \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} - j \cdot p_p \cdot \omega_m \cdot \bar{\Psi}_r \quad (3.15)$$

Tato podoba rovnice je nejvhodnější pro matematický model pracující v reálném čase. Jako stavové veličiny jsme zvolili  $i_{sx}$ ,  $i_{sy}$ ,  $\Psi_{rx}$  a  $\Psi_{ry}$ . Z předchozích rovnic vyloučíme  $\bar{\Psi}_s$  a  $\bar{i}_r$ . [4]

$$\bar{i}_s + \bar{i}_r = \bar{i}_m = \frac{\bar{\Psi}_h}{L_h} \quad (3.16)$$

$$\bar{i}_r = -\bar{i}_s + \frac{\bar{\Psi}_h}{L_h} = -\bar{i}_s + \frac{\bar{\Psi}_r}{L_h} - \frac{L_{r\sigma}}{L_h} \cdot \bar{i}_r \quad (3.17)$$

$$\bar{i}_r = -\frac{L_h}{L_r} \cdot \bar{i}_s - \frac{1}{L_r} \cdot \bar{\Psi}_r \quad (3.18)$$

$$\bar{\Psi}_s = \bar{\Psi}_r + L_{s\sigma} \bar{i}_s - L_{r\sigma} \cdot \bar{i}_r = \bar{\Psi}_r + L_{s\sigma} \bar{i}_s - \frac{L_{r\sigma} \cdot L_h}{L_r} \cdot \bar{i}_s - \frac{L_{r\sigma}}{L_r} \cdot \bar{\Psi}_r \quad (3.19)$$

$$\bar{\Psi}_s = \frac{L_h}{L_r} \cdot \bar{\Psi}_r + \left( L_{s\sigma} + \frac{L_h}{L_r} \cdot L_{r\sigma} \right) \cdot \bar{i}_s \quad (3.20)$$

$\bar{\Psi}_s$  a  $\bar{i}_r$  dosadíme do stavových rovnic [4]

$$\bar{u}_s = R_r \cdot \bar{i}_s + \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} = R_r \cdot \bar{i}_s + \frac{L_h}{L_r} \cdot \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} + \left( L_{s\sigma} + \frac{L_h}{L_r} \cdot L_{r\sigma} \right) \cdot \frac{d\bar{i}_s}{dt} \quad (3.21)$$

$$0 = -R_r \cdot \frac{L_h}{L_r} \cdot \bar{i}_s + \left( \frac{R_r}{L_r} - j \cdot p_p \cdot \omega_m \right) \cdot \bar{\Psi}_r + \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} \quad (3.22)$$

Po rozepsání rovnic do x-ové a y-ové složky dostaneme:

$$u_{sx} = R_r \cdot i_{sx} + \frac{L_h}{L_r} \cdot \frac{d\Psi_{rx}}{dt} + \left( L_{s\sigma} + \frac{L_h}{L_r} \cdot L_{r\sigma} \right) \cdot \frac{di_{sx}}{dt} \quad (3.23)$$

$$u_{sy} = R_r \cdot i_{sy} + \frac{L_h}{L_r} \cdot \frac{d\Psi_{ry}}{dt} + \left( L_{s\sigma} + \frac{L_h}{L_r} \cdot L_{r\sigma} \right) \cdot \frac{di_{sy}}{dt} \quad (3.24)$$

$$0 = -R_r \cdot \frac{L_h}{L_r} \cdot i_{sx} + \frac{R_r}{L_r} \cdot \Psi_{rx} + p_p \cdot \omega_m \cdot \Psi_{ry} + \frac{d\Psi_{rx}}{dt} \quad (3.25)$$

$$0 = -R_r \cdot \frac{L_h}{L_r} \cdot i_{sy} + \frac{R_r}{L_r} \cdot \Psi_{ry} + p_p \cdot \omega_m \cdot \Psi_{rx} + \frac{d\Psi_{ry}}{dt} \quad (3.26)$$

$$M = k_p \cdot p_p \cdot \frac{L_h}{L_r} \cdot (\Psi_{rx} \cdot i_{sy} - \Psi_{ry} \cdot i_{sx}) = J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} + M_z \quad (3.27)$$

Následně si z 3. a 4. rovnice vyjádříme derivace toků a dosadíme do 1. a 2. rovnice [4]

$$\frac{di_{sx}}{dt} = -\alpha \cdot i_{sx} + \beta \cdot \Psi_{rx} + \gamma \cdot \omega_m \cdot \Psi_{ry} + \delta \cdot u_{sx} \quad (3.28)$$

$$\frac{di_{sy}}{dt} = -\alpha \cdot i_{sy} - \gamma \cdot \omega_m \cdot \Psi_{rx} + \beta \cdot \Psi_{ry} + \delta \cdot u_{sy} \quad (3.29)$$

$$\frac{d\Psi_{rx}}{dt} = R_r \cdot \frac{L_h}{L_r} \cdot i_{sx} - \frac{R_r}{L_r} \cdot \Psi_{rx} - p_p \cdot \omega_m \cdot \Psi_{ry} \quad (3.30)$$

$$\frac{d\Psi_{ry}}{dt} = R_r \cdot \frac{L_h}{L_r} \cdot i_{sy} - \frac{R_r}{L_r} \cdot \Psi_{ry} - p_p \cdot \omega_m \cdot \Psi_{rx} \quad (3.31)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \varepsilon \cdot \Psi_{rx} \cdot i_{sy} - \varepsilon \cdot \Psi_{ry} \cdot i_{sx} - \frac{1}{J} \cdot M_z \quad (3.32)$$

$\alpha = \frac{R_s + R_r \cdot \frac{L_h^2}{L_r^2}}{\lambda}$	$\beta = \frac{R_r \cdot \frac{L_h^2}{L_r^2}}{\lambda}$	$\gamma = \frac{L_h}{L_r} \cdot p_p$	$\delta = \frac{1}{\lambda}$	$\varepsilon = \frac{k_p \cdot p_p \cdot \frac{L_h}{L_r}}{J}$
$\lambda = L_{s\sigma} + L_{r\sigma} \cdot \frac{L_h}{L_r}$				

Tab. 1 Parametry stavových rovnic [převzato z 4]

Výsledné okamžité hodnoty  $i_{sx}$ ,  $i_{sy}$ ,  $\Psi_{rx}$ ,  $\Psi_{ry}$  a  $\omega_m$  se dopočítají pomocí Eulerovi metody:

$$i_{sx}(k+1) = i_{sx}(k) + \frac{di_{sx}}{dt} \quad (3.32)$$

$$i_{sy}(k+1) = i_{sy}(k) + \frac{di_{sy}}{dt} \quad (3.33)$$

$$\Psi_{rx}(k+1) = \Psi_{rx}(k) + \frac{d\Psi_{rx}}{dt} \quad (3.34)$$

$$\Psi_{ry}(k+1) = \Psi_{ry}(k) + \frac{d\Psi_{ry}}{dt} \quad (3.35)$$

$$\omega_m(k+1) = \omega_m(k) + \frac{d\omega_m}{dt} \quad (3.36)$$

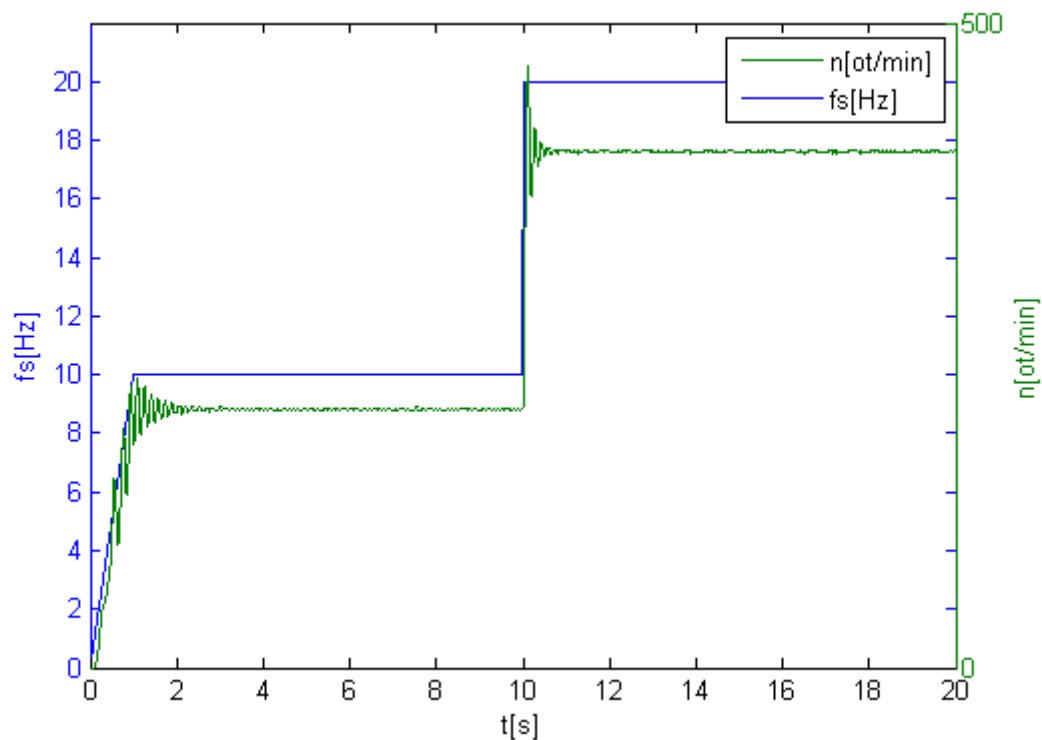
Pokud má veličina za sebou v závorce (k+1), znamená to, že se jedná o hodnotu následující, pokud má v závorce (k), jedná se o hodnotu předchozí. Stavové rovnice se někdy také používají v maticovém tvaru. [4]

## 4 Výsledky simulace

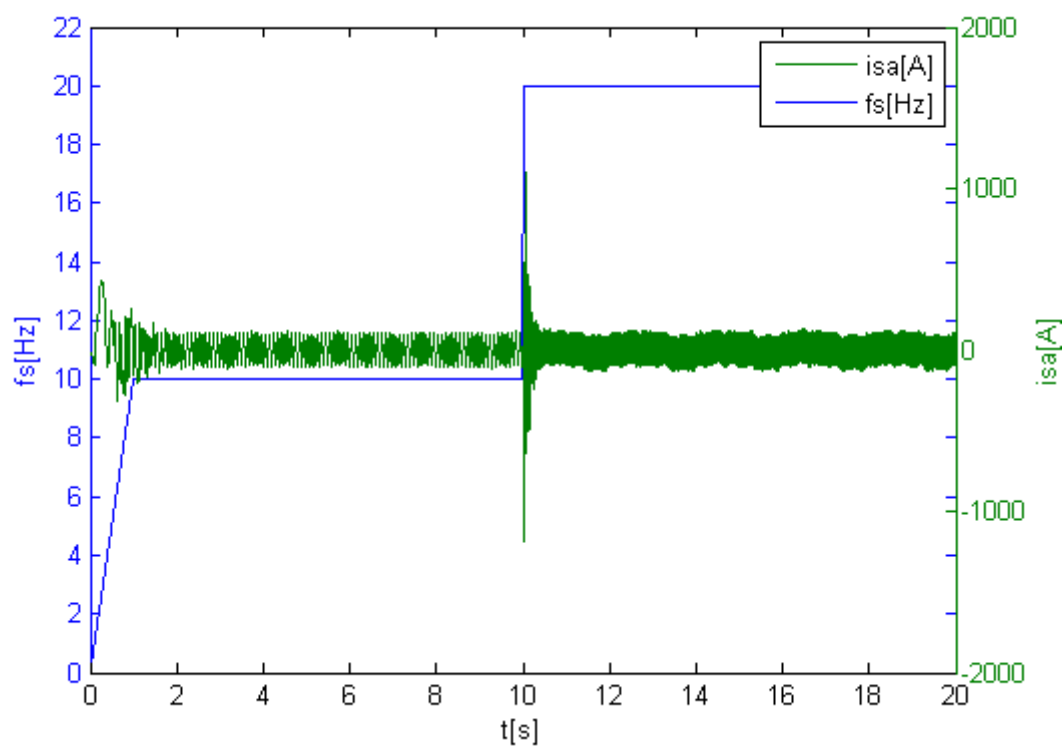
Výsledky simulace jsou zaměřeny na odezvu jednotlivých způsobů zapojení pohonu. Zobrazují přechodové děje, které nastanou po změně vybraných vstupních veličin.

### 4.1 Reakce pohonu bez čidla otáček na skokovou změnu frekvence

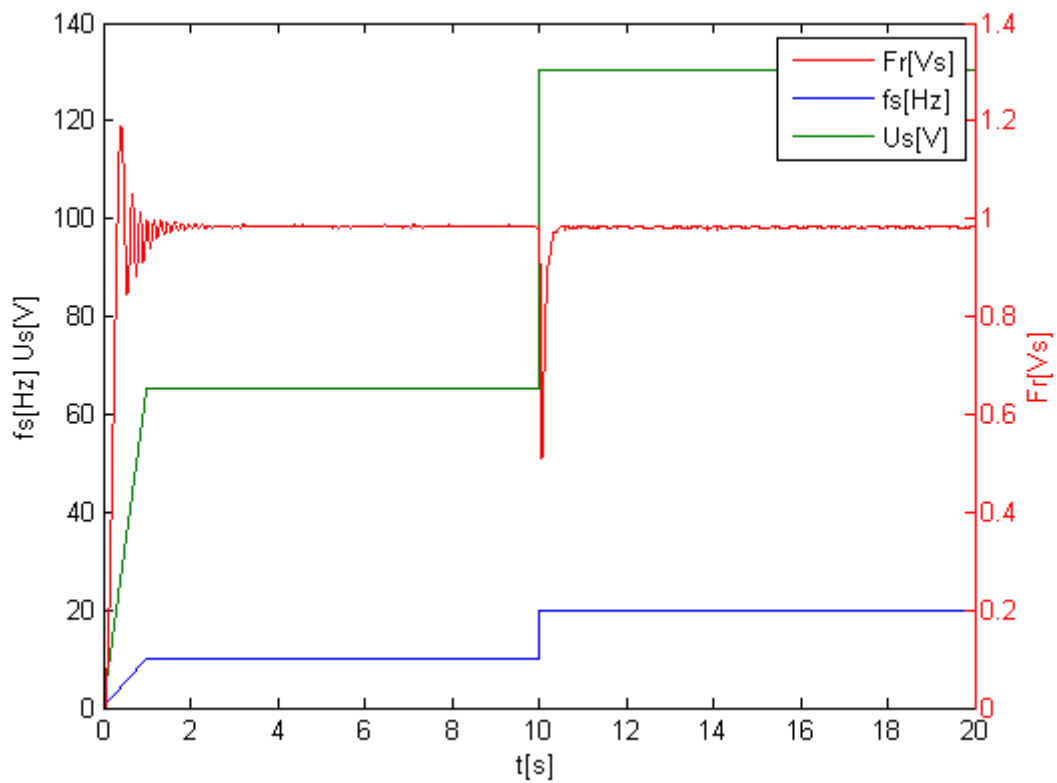
Princip a schéma zapojení jsou podrobněji probrány v kapitole 3.1.1. Při simulaci byla skokově měněna statorová frekvence v čase  $t=10$  s. Sledovány byly přechodové děje mechanických otáček, proudu a magnetického indukčního toku.



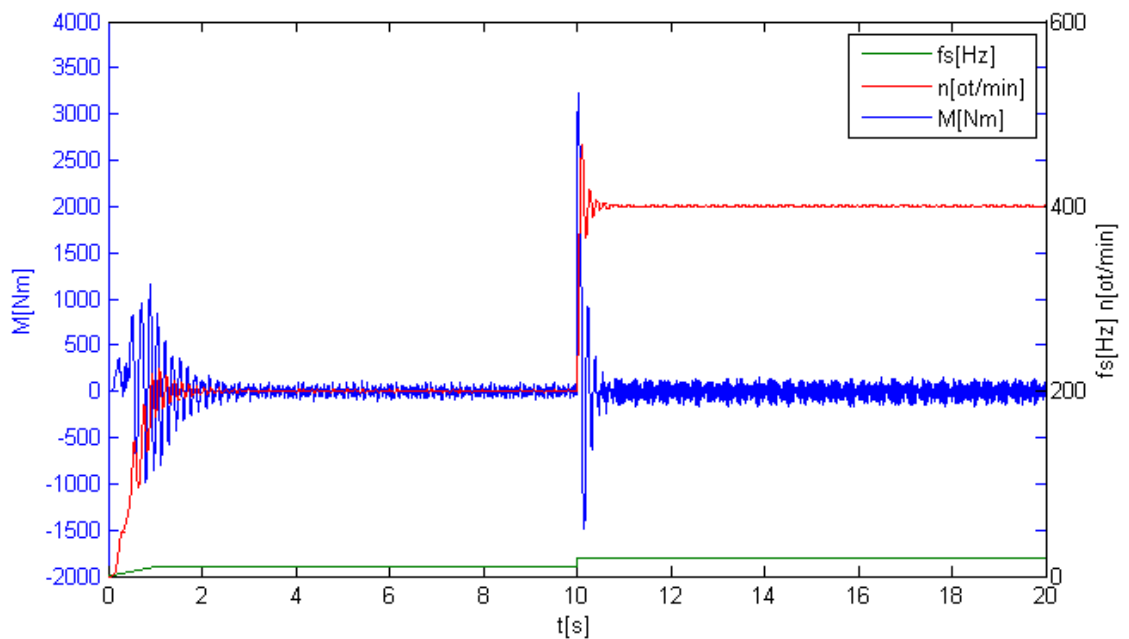
Obr. 4.1 Reakce mechanických otáček na skokovou změnu statorové frekvence v čase  $t=10$  s



Obr. 4.2 Průběh proudu po skokové změně statorové frekvence v čase  $t=10$  s



Obr. 4.3 Průběh magnetického indukčního toku po skokové změně statorové frekvence v čase  $t=10$  s



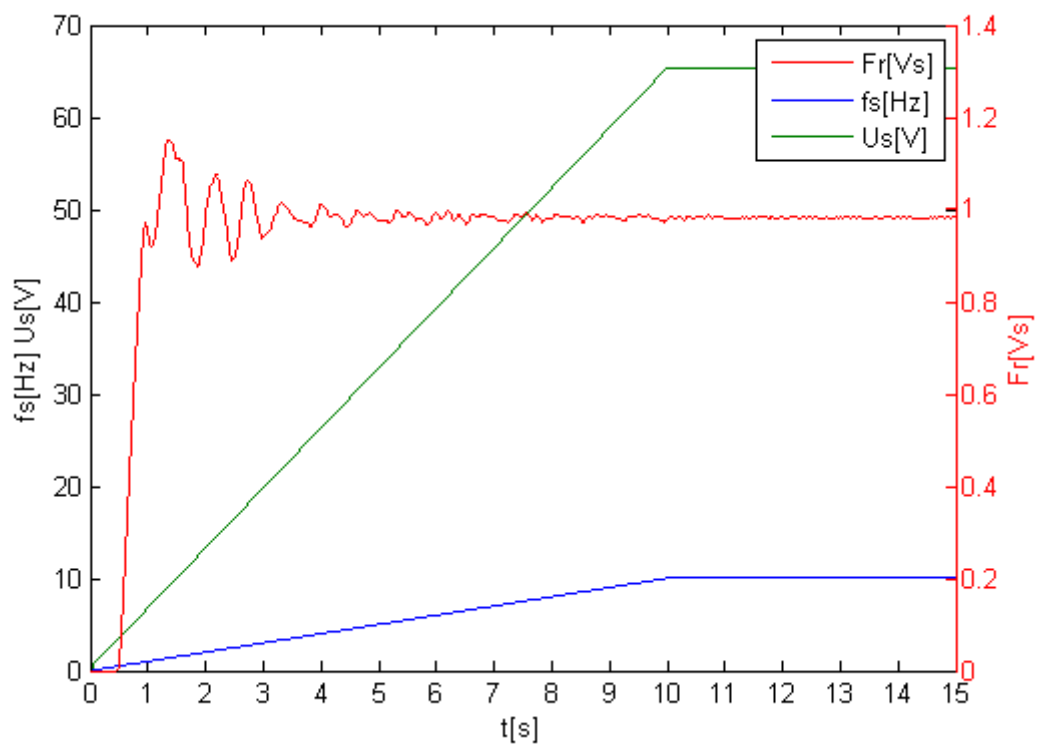
Obr. 4.4 Průběh momentu po skokové změně statorové frekvence v čase  $t=10$  s

Obr. 4.1, obr. 4.2, obr. 4.3, obr. 4.4 – v čase  $t=10$  jsme skokově změnili statorovou frekvenci a to mělo za následek prudký nárůst proudu, momentu a otáček. Tyto špičky jsou však nepřijatelné, protože motor by je nemusel zvládnout. Docházelo by totiž k velkému tepelnému

a mechanickému namáhání. K omezení těchto špiček můžeme použít jeden z těchto bloků, který nám zajistí dostatečně pomalý nárůst frekvence, např. regulátor proudu řídicí řízený omezovač napětí, regulátor proudu, který zajišťuje snižování změny frekvence, nebo regulátorem otáček viz kapitola 3.1.3.

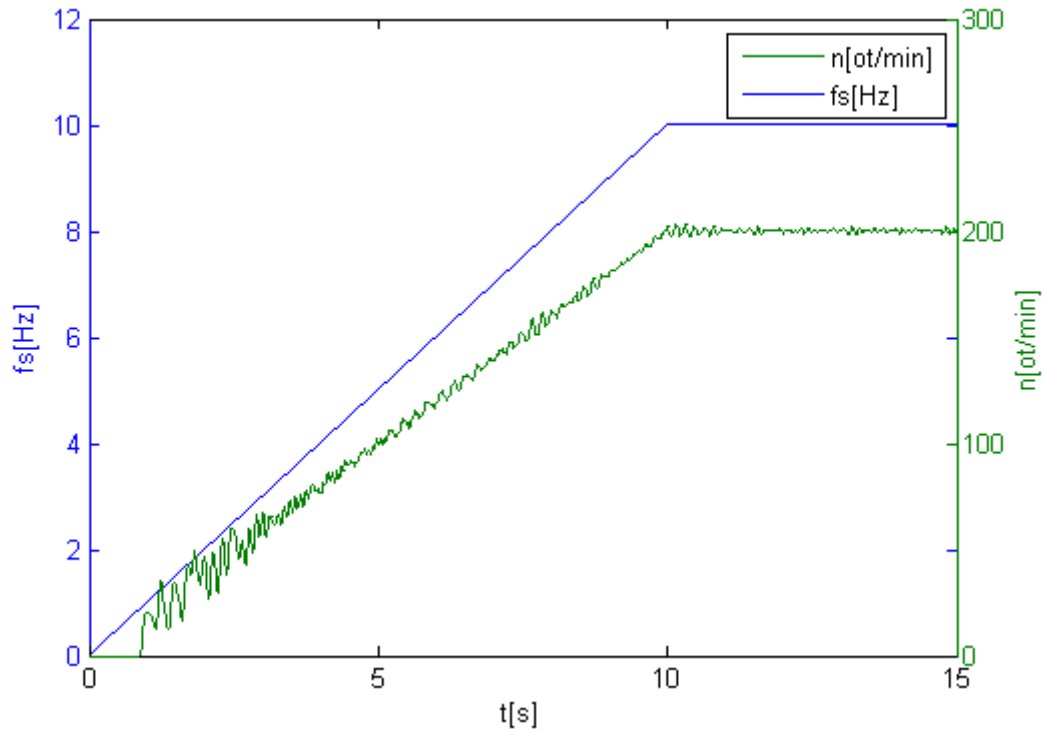
## 4.2 Reakce pohonu bez čidla otáček na změnu satorové frekvence po rampě

V této části jsou zobrazeny přechodové děje pohonu bez čidla otáček, řízeného skalárním řízením, při plynulé změně satorové frekvence po rampě. Popisuje se zde rozběh asynchronního motoru.

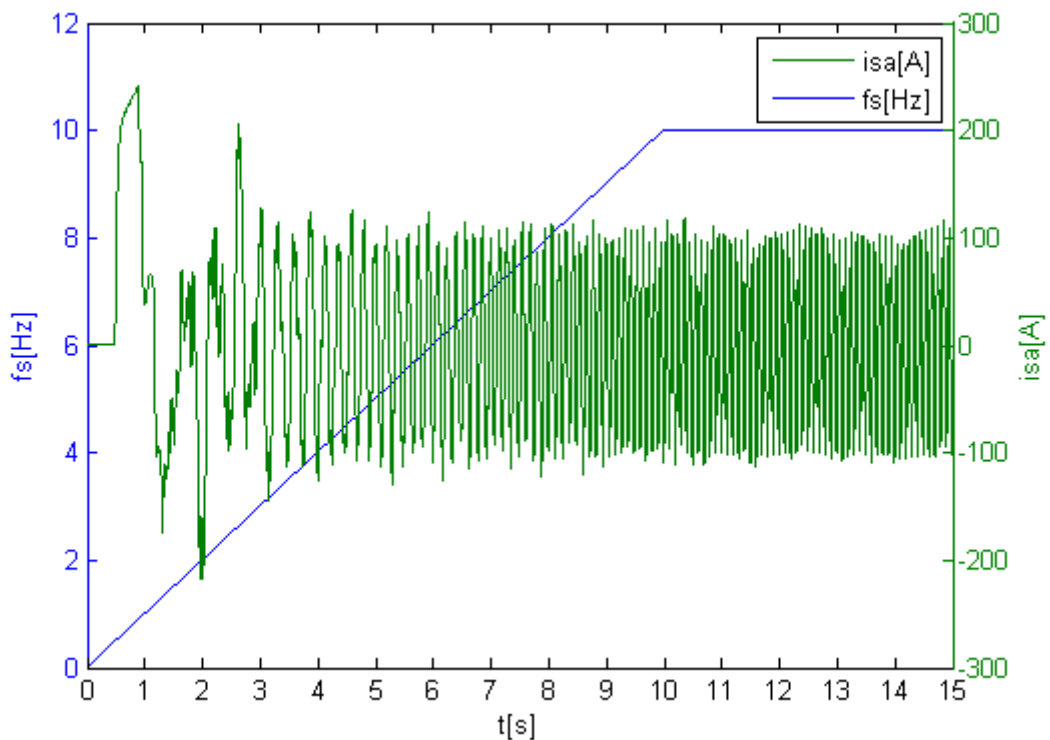


Obr. 4.5 Rozběh asynchronního motoru po rampě





Obr. 4.6 Průběh mechanických otáček při frekvenci měněné po rampě

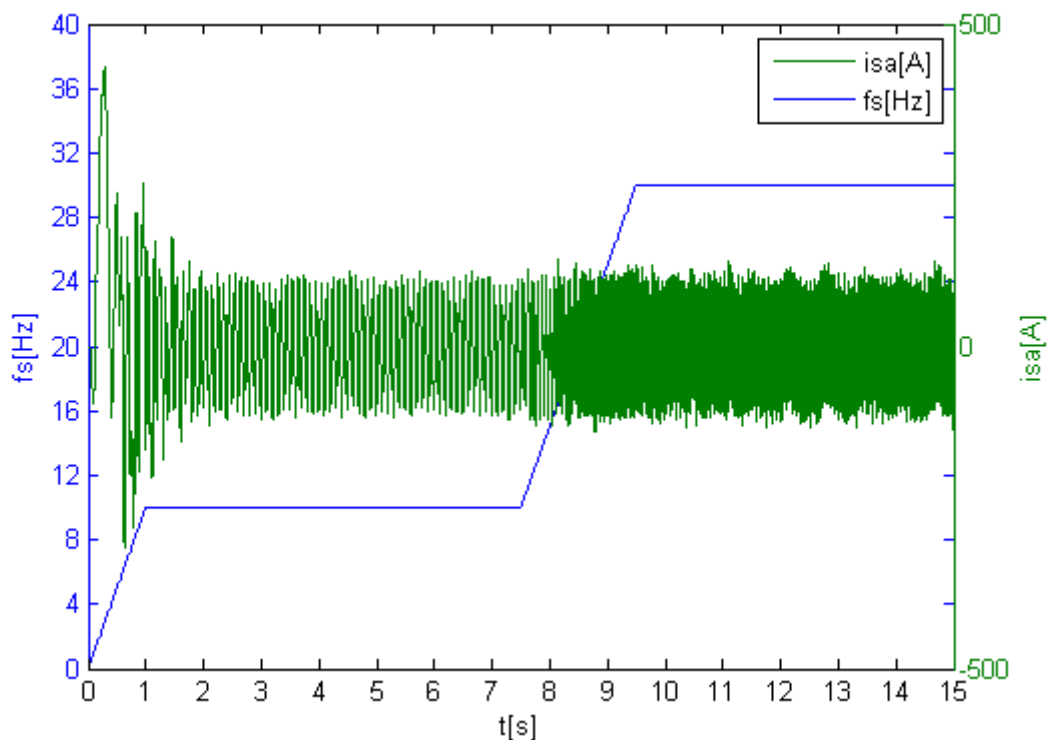


Obr. 4.7 Průběh proudu při frekvenci měněné po rampě

Obr. 4.5 zobrazuje reakci asynchronního motoru na změnu statorové frekvence po rampě. To, že je magnetický indukční tok zpočátku nulový, je způsobeno zvolením malého úbytku  $\Delta U$ , jehož zvětšení by však vedlo i k nárůstu počátečního proudu.

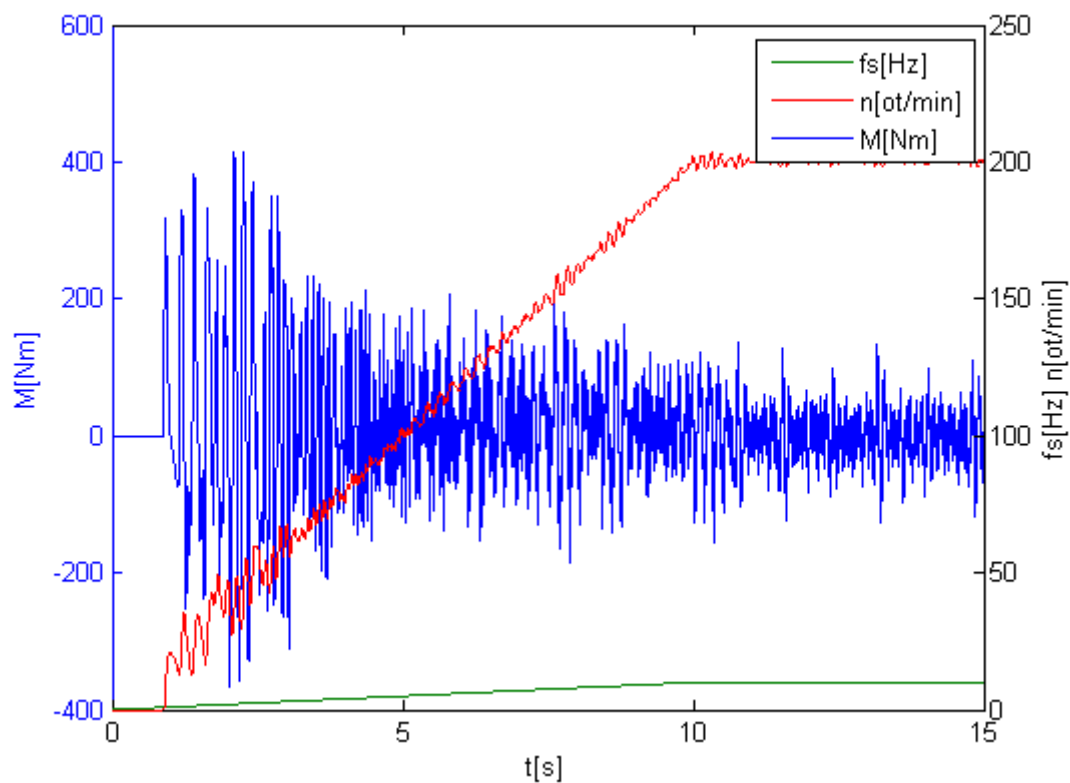
Na obr. 4.6 je vidět, že v oblasti malé statorové frekvence je vidět, že otáčky se mechanické otáčky se mění velmi pomalu, což je důsledkem nenabuzenosti stroje, jak dokládá průběh magnetického indukčního toku na obr.5. Mechanické otáčky jsou zvlněné, což je způsobeno pulzací momentu, která je způsobena kmitajícím magnetickým indukčním tokem.

Na obr. 4.7 je patrný nárůst proudu při rozběhu asynchronního motoru, kdy dochází k přechodným dějům. Zprvu dochází k prudkému nárůstu proudu odpovídajícího úbytku napětí  $\Delta U$  a strmosti rampy  $f_s$ . Čím strmější je rampa, tím větší je proud.



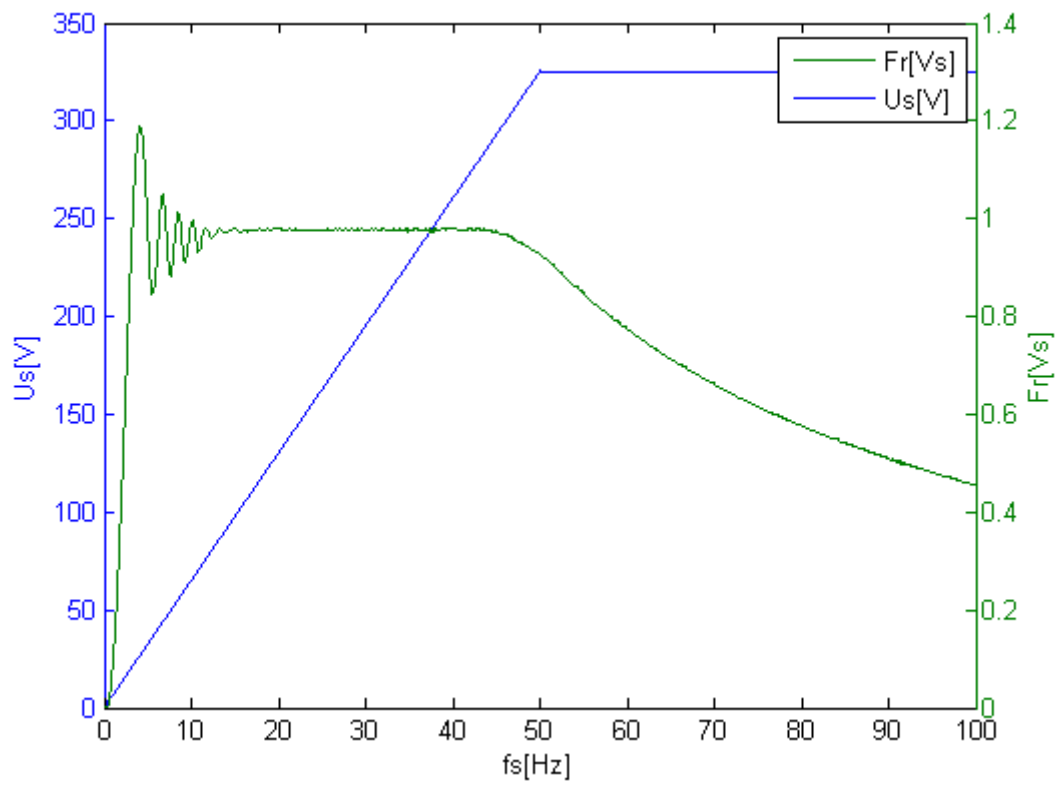
**Obr. 4.8** Průběh proudu při statorové frekvenci měněné po rampě

V druhé polovině obr. 4.8 je vidět, že po dalším zvyšování frekvence je maximální hodnota proudu stejná a tudíž i magnetický indukční tok je konstantní.

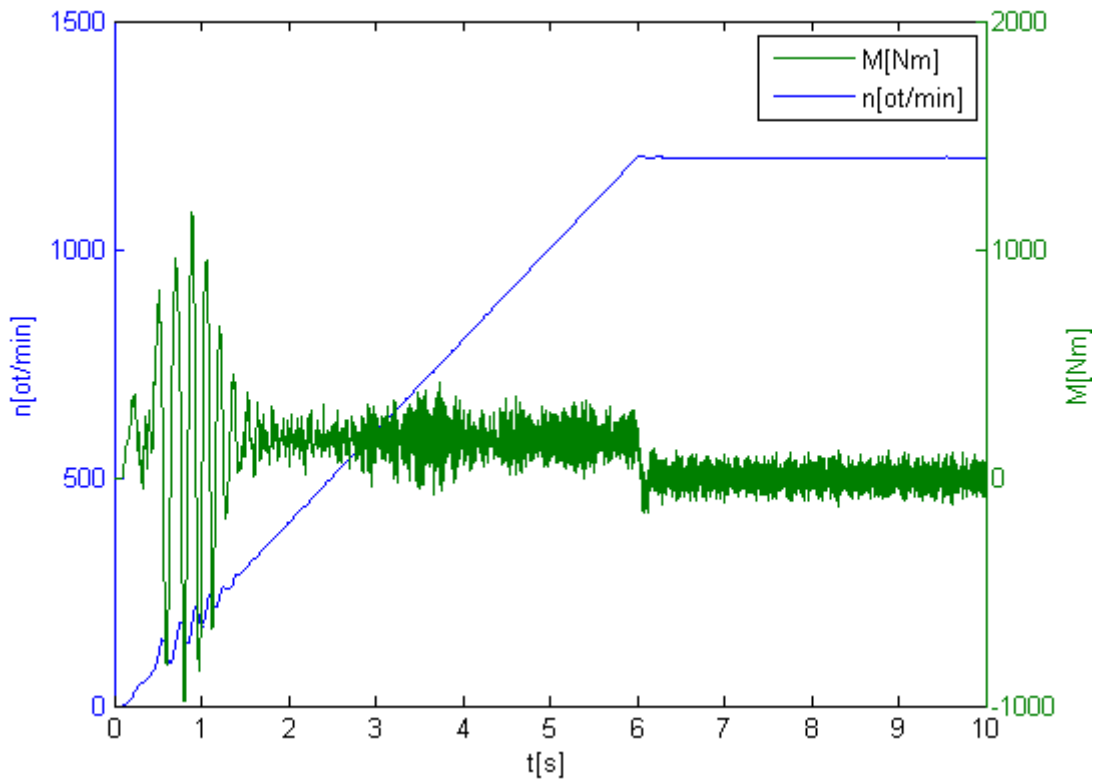


Obr. 4.9 Rozběh asynchronního motoru po rampě

Obr. 4.9 – Při rozběhu asynchronního motoru dochází ke špičkám momentu, který je přímo úměrný proudu. Po dosažení požadovaných otáček moment klesá k nule.



Obr. 4.10 Rozběh asynchronního motoru po rampě nad jmenovité otáčky



Obr. 4.11 Rozběh asynchronního motoru nad jmenovité otáčky

Obr. 4.10 zobrazuje typické vlastnosti skalárního řízení. Po dosažení jmenovité hodnoty otáček, jimž odpovídá jmenovitá frekvence, je napájecí napětí dále konstantní a motor se pomalu začíná odbuzovat. K odbuzování dochází přirozeně a nekontrolovatelně.

Obr 4.11 Při rozběhu asynchronního motoru dochází ke špičkám momentu, které se postupně ustalují, při dosažení jmenovitých otáček dochází k odbuzení asynchronního motoru (napětí je nadále konstantní a klesá magnetický indukční tok). Začnou-li se otáčky  $n$  blížit  $n_w$ , pak moment postupně klesá až na zátěžný moment, který je v našem případě nulový.

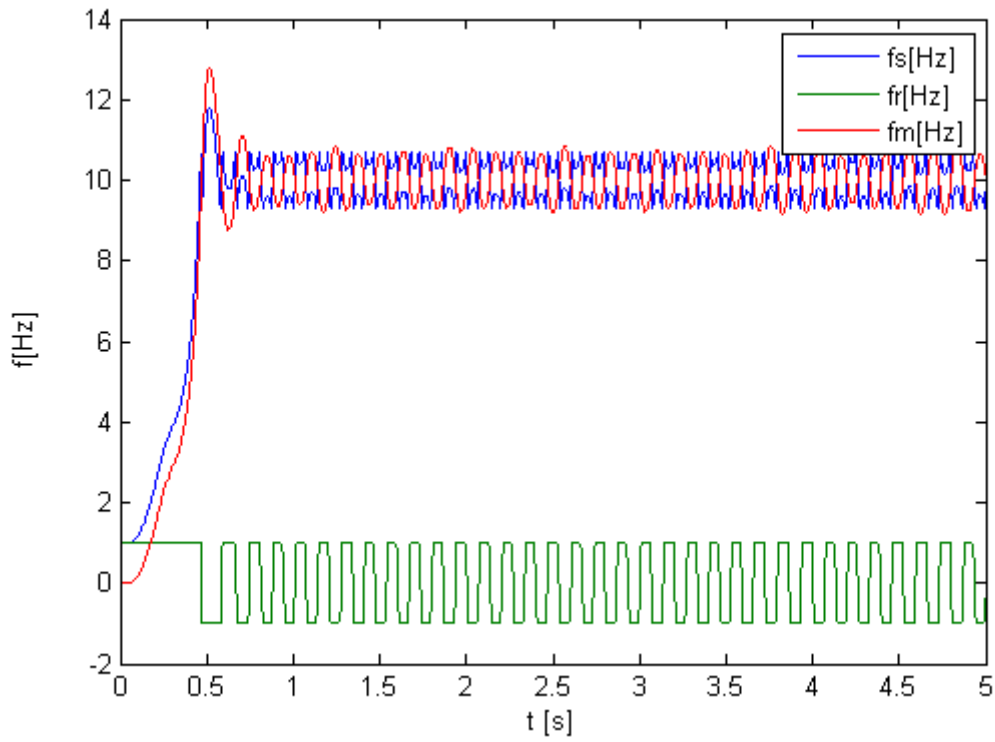
### 4.3 Pohon s čidlem otáček

Jedná se o simulaci pohonu s čidlem otáček popsaném v kapitole 3.1.3. Na začátku je popsán způsob, jak probíhalo ladění regulátoru. Byly sledovány přechodné děje při skokové změně požadovaných otáček.

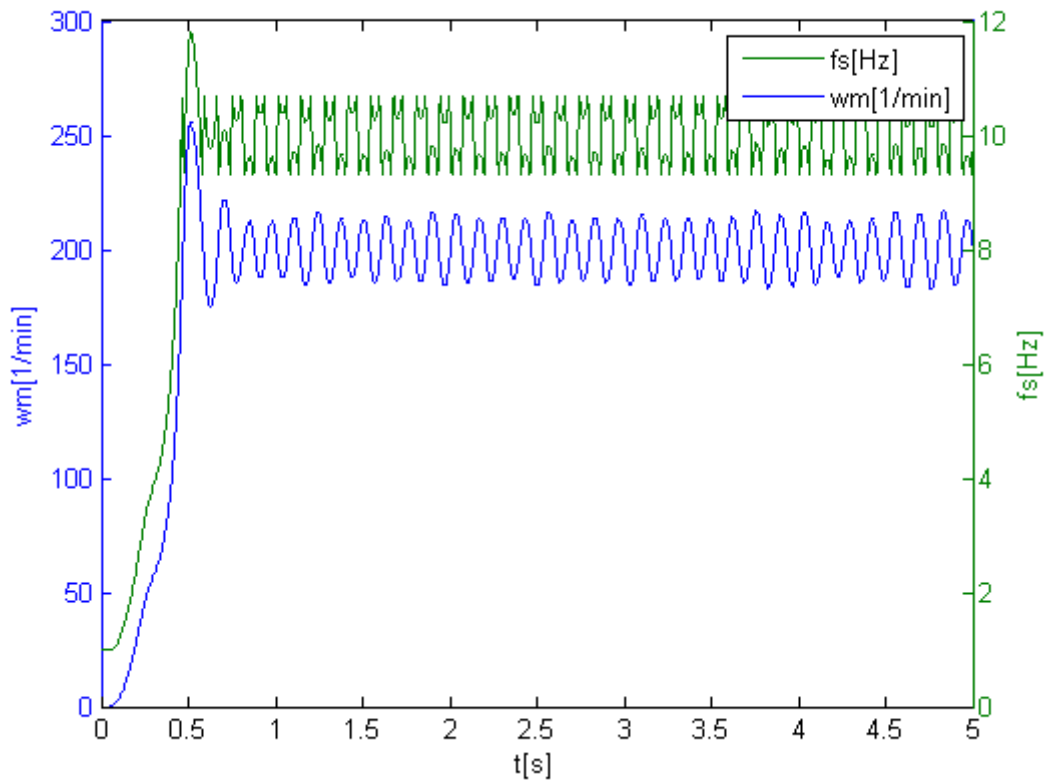
#### 4.3.1 Ladění regulátoru

Regulátor jsme ladili experimentálně tímto způsobem:

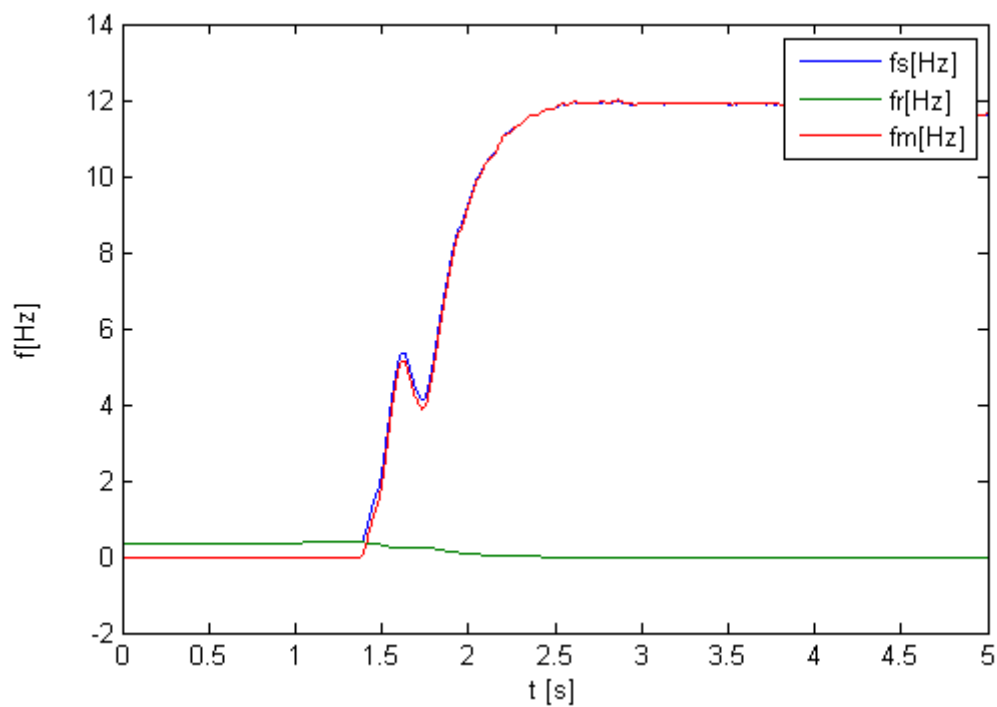
- 1) Poměr zesílení regulátoru  $K_p$  a časové konstanty  $\tau_r$  jsme zvolili tak velký, abychom se dostali za mez stability a získali tak regulátor, který bude neustále kmitat.
- 2) Dále jsme zvolily poměr  $K_p/\tau_r$  co nejmenší. Regulátor se pohybuje pod mezí stability a nikdy se neustálí
- 3) Ustálený regulátor má hodnotu poměru  $K_p/\tau_r$  mezi ad1 a ad2



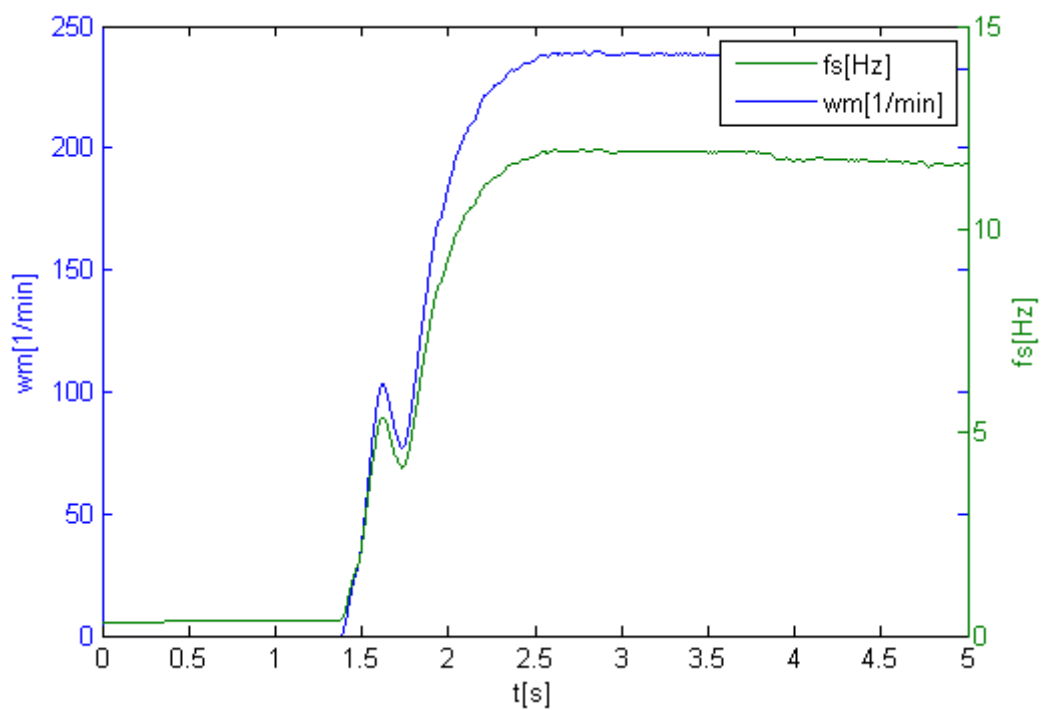
Obr. 4.12a Kmitavý regulátor – průběh frekvencí



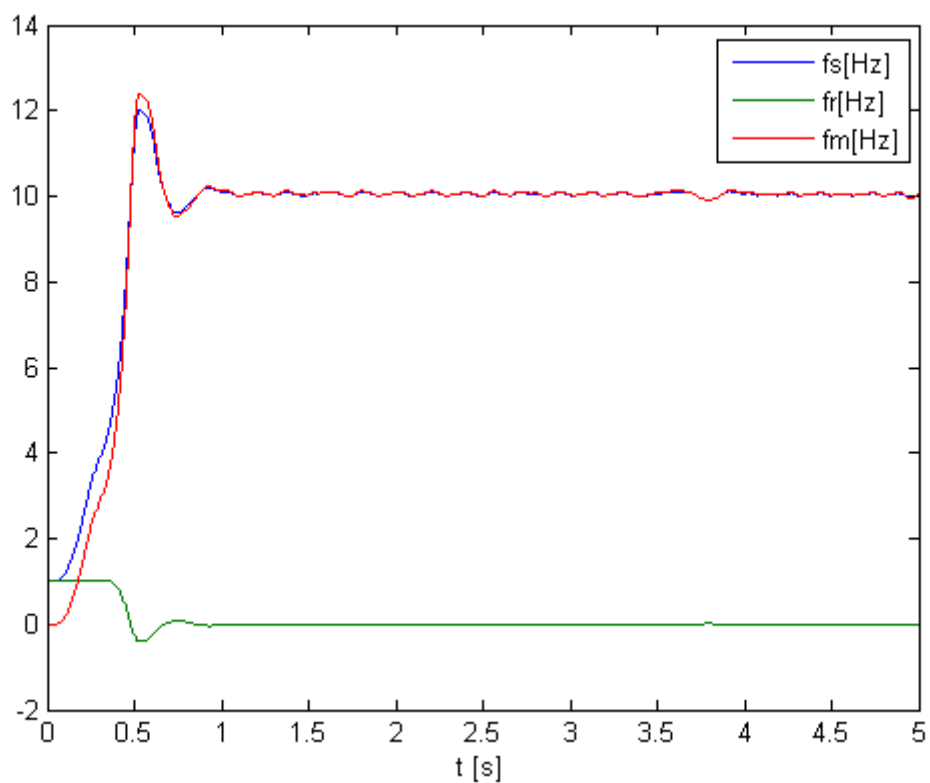
Obr. 4.12b Kmitavý regulátor – průběh otáček a statorové frekvence



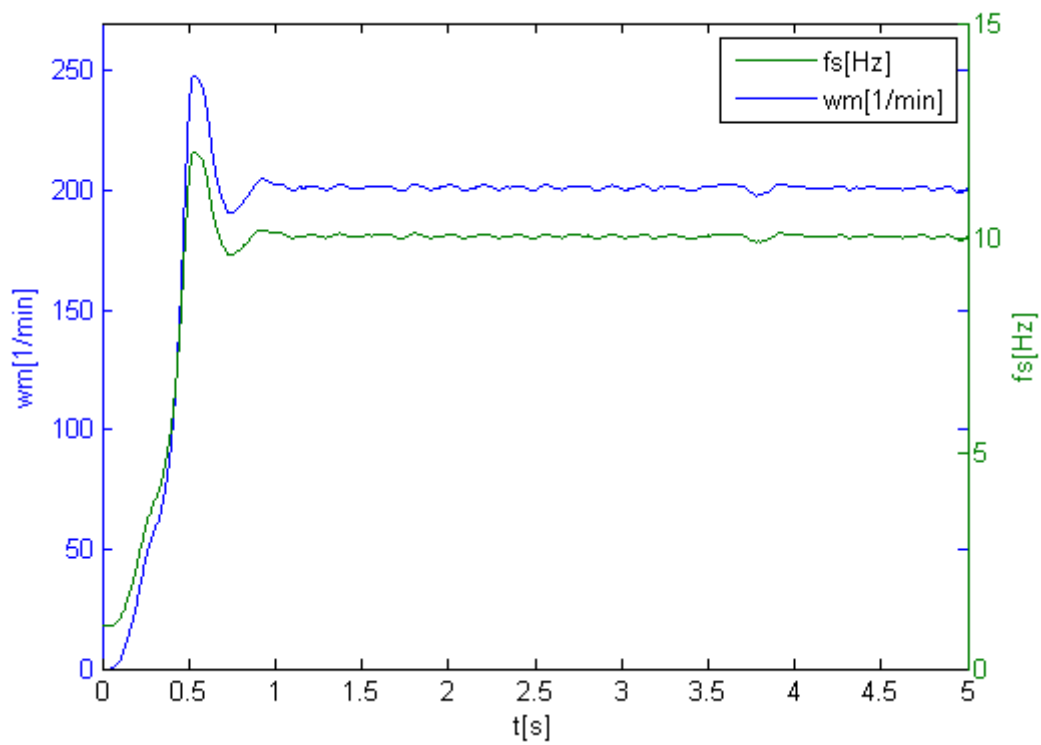
Obr. 4.13a Neustálený regulátor – průběh frekvencí



Obr. 4.13b Neustálený regulátor – průběh otáček a statorové frekvence



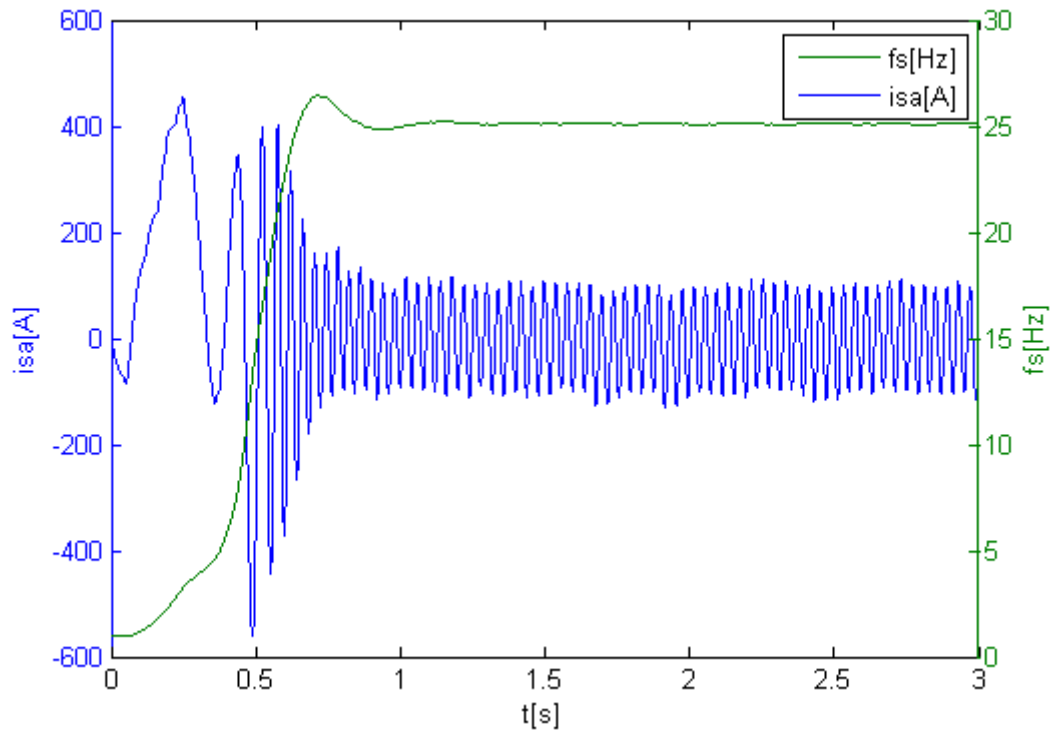
Obr. 4.14a Ustálený regulátor – průběh frekvencí



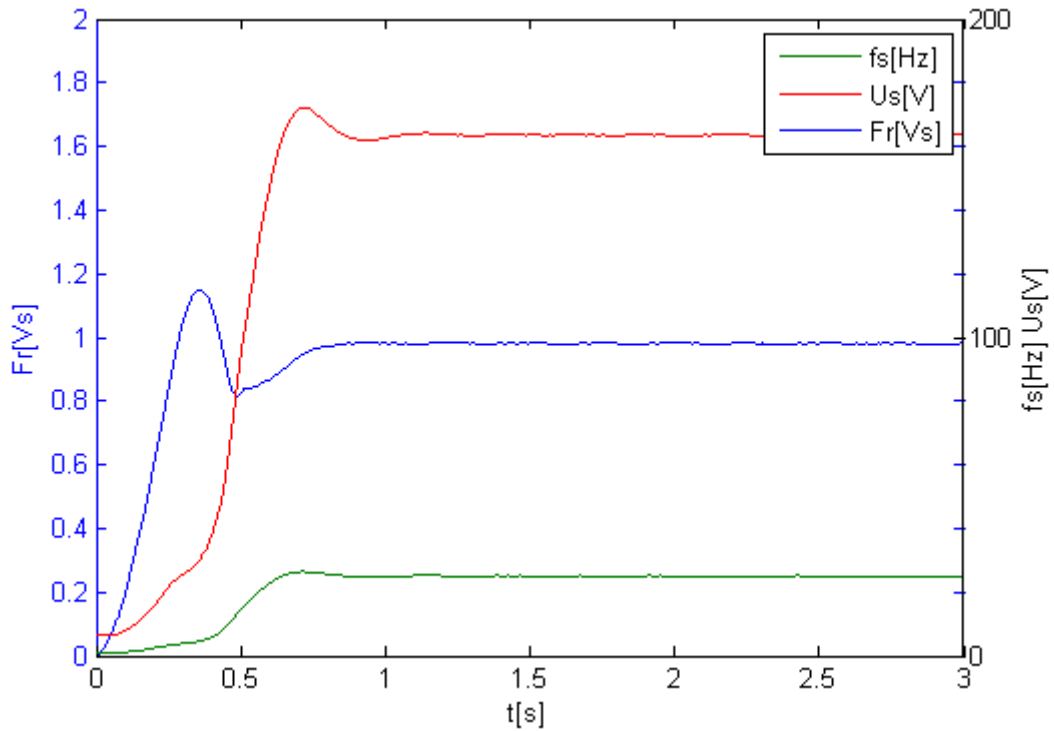
Obr. 4.14b Ustálený regulátor – průběh otáček a statorové frekvence



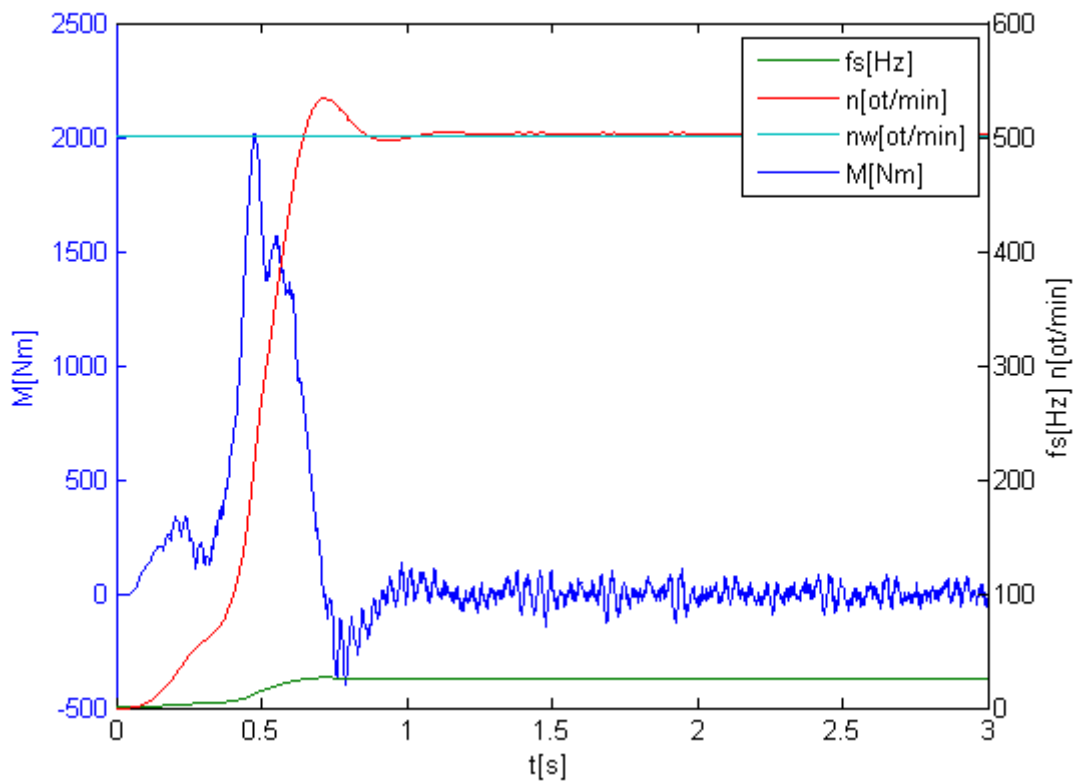
**4.3.2 Reakce regulátoru na změnu požadovaných otáček**



Obr. 4.15 Rozběh asynchronního motoru s regulátorem otáček



Obr. 4.16 Rozběh asynchronního motoru nad jmenovité otáčky s čidlem otáček

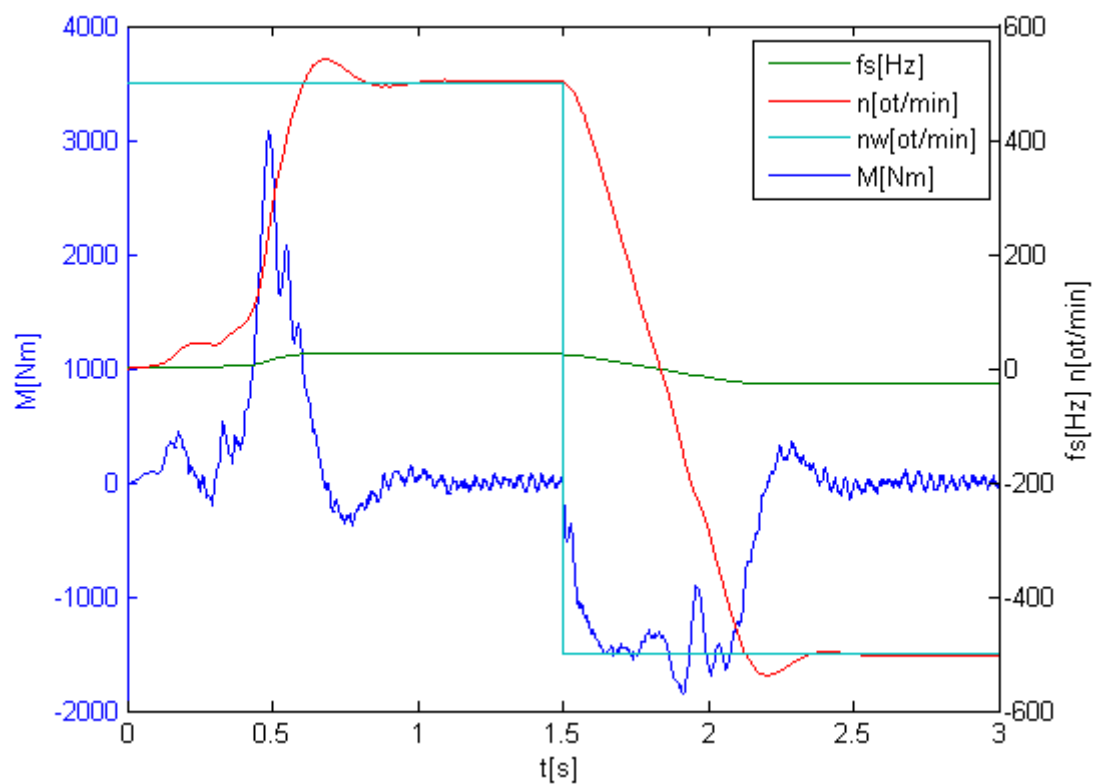


Obr. 4.17 Rozběh asynchronního motoru nad jmenovité otáčky s čidlem otáček

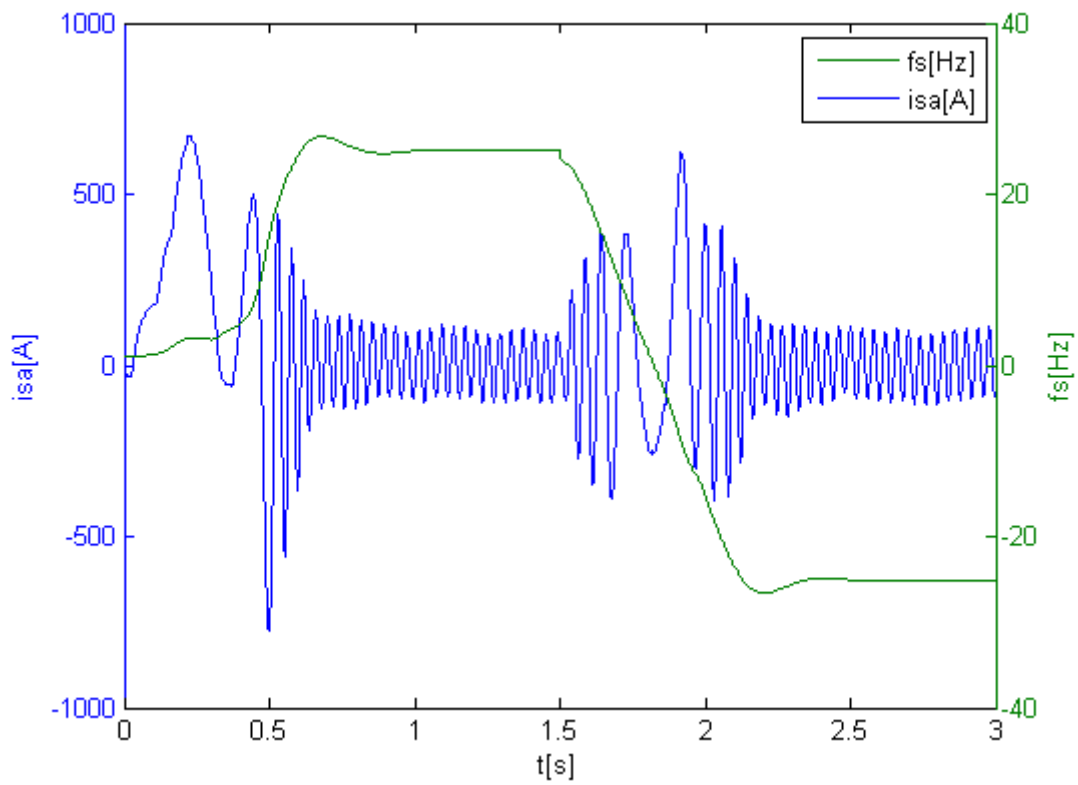
Na obr. 4.15 je vidět, že maximální hodnota proudu je omezoována velikostí rotorové frekvence

Obr. 4.17 popisuje změnu momentu při změně otáček  $n$  z 0 na 1500. Moment se co nejrychleji změní na maximální hodnotu. Po dosažení jmenovitých otáček  $n = 1000$  se motor začíná odbuzovat, magnetický indukční tok klesá, viz obr. 4.16 a s ním klesá i moment, který je přímo úměrný jeho kvadrátu. Pokud se  $n$  začne blížit  $n_w$ , dojde k poklesu momentu na hodnotu momentu zátěže. Ta je v našem případě rovna nule.

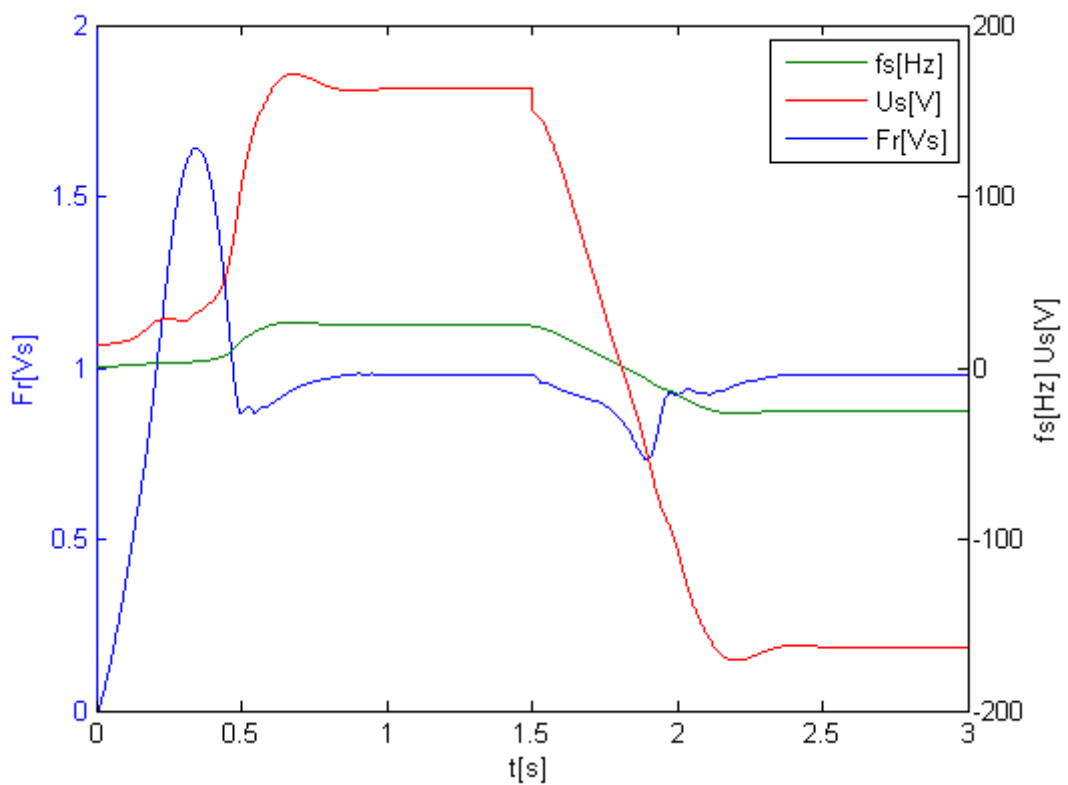
### 4.3 Reverzace asynchronního motoru s čidlem otáček



Obr. 4.18 Reverzace asynchronního motoru



Obr. 4.19 Průběh proudu při reverzaci asynchronního motoru



Graf 20 Průběh magnetického indukčního toku při reverzaci asynchronního motoru

Obr. 4.18, Obr. 4.19, Obr. 4.20 – na těchto grafech je zobrazen průběh otáček, momentu, statorového proudu, magnetického indukčního toku a statorového napětí při reverzaci asynchronního motoru. Regulátor otáček nám zajistí co nejrychlejší změnu, při které jsou omezovány maximální hodnoty proudu a momentu. V čase  $t=1.5$  s dochází k poklesu otáček, začíná klesat magnetický indukční tok a moment se dostává do záporných hodnot. Při otáčkách blížících se nule roste magnetický indukční tok. Motor se začíná rozebíhat na druhou stranu. Po dosažení požadovaných otáček moment klesne na moment zátěže, který je v tomto případě nulový.

## Závěr

Pomocí programu Matlab jsme simulovali vybrané přechodové děje. Asynchronní motor jsme si nahradili soustavou rovnic (3.28, 3.29, 3.30, 3.31, 3.32). Asynchronní motor byl řízen výstupním napětím střídače, z něhož jsme si vypočetli napětí na zátěži a určili výsledný vektor napětí rozložený do x-ové a y-ové složky (3.12, 3.13). Tento vektor poté vstupoval do soustavy rovnic charakterizující asynchronní motor. Skalární řízení se provádělo změnou velikosti vektoru napětí v závislosti na aktuální frekvenci, viz kapitola 3.1.

Zkoumali jsme jednotlivé způsoby zapojení skalárního řízení a porovnávali mezi sebou. Jako nejvýhodnější nám vyšlo zapojení skalárního řízení s čidlem otáček (obr.3.3). Toto zapojení má velmi rychlé přechodné děje a zároveň zde dochází k omezování maximálních hodnot proudu (obr. 4.15) prostřednictvím omezování rotorové frekvence. Na skokovou změnu požadovaných otáček reaguje s maximálním možným dovoleným momentem. Při rozběhu asynchronního motoru (obr. 4.15, obr. 4.16, obr. 17) byl magnetický indukční tok zpočátku malý, což bylo způsobeno malým  $\Delta U$ . Při následném zvyšování otáček a napětí až na jmenovité hodnoty by měl být magnetický indukční tok konstantní. Po překročení jmenovité hodnoty otáček zůstává napětí konstantní a motor se začne pomalu odbuzovat, magnetický indukční tok klesá a s ním klesá i moment.

Nevýhodou zapojení bez čidla otáček je, že můžeme zvolit až příliš rychlou rampu blížící se skokové změně, která by mohla způsobit proudové špičky, které by mohly motor poškodit. Další nevýhodou by mohlo naopak být, že zvolíme rampu až příliš pomalou a čekali bychom na ustálení otáček zbytečně dlouhou dobu.

Skalární řízení je velmi jednoduché, ale má však své nevýhody a těmi jsou hlavně, že moment, budící tok a proud se nedají přímo řídit. Tyto problémy lze vyřešit aplikací vektorového řízení.

### Hlavní přínosy práce:

- Sestavení simulačního programu
- Simulační analýza vybraných přechodových dějů
- Část simulačního programu se dá vhodně upravit a použít pro implementaci do řídicího mikroprocesoru laboratorního prototypu
- Prohloubení znalostí o asynchronním motoru a jeho skalárního řízení

## Seznam literatury a použitých zdrojů

- [1] RUDOLF MRAVEC. *Elektrické stroje a přístroje: I. Elektrické stroje*. Praha: SNTL Praha, 1982. ISBN 0450679.
- [2] Asynchr\_motor\_teorie.pdf. *Asynchr\_motor\_teorie.pdf* [online]. [cit. 2012-06-04]. Dostupné z: [www.pslib.cz](http://www.pslib.cz)
- [3] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika: Svazek 3: Měníče s vlastní komutací a bez komutace*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2003. ISBN 80-7082-980-X.
- [4] ZEMAN, Karel, Zdeněk PEROUTKA a Martin JANDA. *Automatická regulace pohonů s asynchronními motory*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2004. ISBN 80-7043-350-7.

## **Seznam příloh**

Příloha A – zadané a vypočítané parametry motoru

Příloha B – Simulační program pro obvod bez čidla otáček

Příloha C – Simulační program pro obvod s čidlem otáček



## Přílohy

### Příloha A – zadané a vypočítané parametry motoru

$R_s = 0,016 \Omega$	$L_s = 0,010234 \text{ H}$	$U_s = 230 \text{ V}$
$R_r = 0,014 \Omega$	$L_r = 0,00049 \text{ H}$	$M_n = 640 \text{ Nm}$
$L_h = 0,00978 \text{ H}$	$p_p = 3$	$P_n = 66,5 \text{ kW}$
$L_{ss} = 0,000454 \text{ H}$	$f_s = 50 \text{ Hz}$	$n_n = 990 \text{ ot/min}$

### Příloha B – Simulační program pro obvod bez čidla otáček

```
function simulace()
clear all; %vycisti pamet

txt=fopen('vysledek.txt','w');
odm3=sqrt(3);
%zadani parametru motoru
Rs=0.016;Rr=0.0144;Lh=0.00978;kp=3/2;pp=3; %Rs-cinny odpor
statoru
Lrsig=0.00049;Lssig=0.000454;;J=8; %Rr-cinny odpor rotoru
Lr=Lh+Lrsig;Ls=Lh+Lssig;

%Lh-Prepoctena magnetiyacni indukcnost %Ls-vlastni indukcnost statoru
%pp-pocet polparu %Lr-vlastni indukcnost rotoru

%Lrsig-rozptylova indukcnost rotoru %J-moment setrvacnosti na hridel
motoru
%Lssig-rozptzlova indukcnost statoru

%zadani konstant
t=0;T=0.000001;k=0;tk=15;
isx=0;isy=0;disx=0;disy=0;irx=0;iry=0;Fr=0;Fry=0;wm=0;

%vypocet konstant
langda=Lssig+Lrsig*Lh/Lr;
alfa=(Rs+Rr*(Lh*Lh)/(Lr*Lr))/langda;
beta=Rr*(Lh/(Lr*Lr))/langda;
gama=(pp*(Lh/Lr))/langda;
delta=1/langda;
epsilon=(kp*pp*Lh)/(Lr*J);

fs=0;fsn=50;fsw=10;
B=0;

Upm=1;fpwm=8000;
dupily=4*Upm*T*fpwm;
upily=Upm;
uc=560;ucp=uc/2;
```

```

Usn=230;deltaU=0.2;Ku=(Usn*sqrt(2)-deltaU)/fsn;           %zkontrolovat
deltaU podle
pocitadlo=0;
u10=0;u20=0;u30=0;uar=0;ubr=0;ucr=0;uz1=0;uz2=0;uz3=0;

while(t<tk)
    %if(t>(tk/2))
    %    fsw=30;
    %end;
    %volani funkce rizeni, ktera ma za ukol skalarni rizeni
    if(pocitadlo==0)

[uar,ubr,ucr,B,fs,Ur]=rizeni(B,fs,fsn,fsw,T,Ku,deltaU,Usn,uc,ucp,t,tk);

        %generovani pwm
        end;

        if(k==1)
            upily=upily+dupily;
        else
            upily=upily-dupily;
        end;
        if(upily>=Upm)
            k=0;
        end;
        if(upily<=(-Upm))
            k=1;
        end;

        %vystup stridace
        if(uar>upily)
            u10=ucp;
        else
            u10=(-ucp);
        end;

        if(ubr>upily)
            u20=ucp;
        else
            u20=(-ucp);
        end;

        if(ucr>upily)
            u30=ucp;
        else
            u30=(-ucp);
        end;
        %napeti na zatezi
        uz1=(1/3)*(2*u10-u20-u30);
        uz2=(1/3)*(2*u20-u10-u30);
        uz3=(1/3)*(2*u30-u10-u20);

        %prostorovy vektor
        usx=(2/3)*uz1-(1/3)*(uz2+uz3);
        usy=(1/sqrt(3))*(uz2-uz3);
    end;
end;

```

```

%model motoru
disx=-alfa*isx+beta*Frx+gama*wm*Fry+delta*usx;
disy=-alfa*isy-gama*wm*Frx+beta*Fry+delta*usy;
dFrx=Rr*(Lh/Lr)*isx-(Rr/Lr)*Frx-pp*wm*Fry;
dFry=Rr*(Lh/Lr)*isy-(Rr/Lr)*Fry+pp*wm*Frx;
dwm=epsilon*Frx*isy-epsilon*Fry*isx;

isx=isx+T*disx;
isy=isy+T*disy;
Frx=Frx+T*dFrx;
Fry=Fry+T*dFry;
Fr=sqrt(Frx*Frx+Fry*Fry);
wm=wm+T*dwm;

isa=isx;
isb=-0.5*isx+0.5*odm3*isy;
isc=-0.5*isx-0.5*odm3*isy;
M=pp*kp*(Lh/Lr)*(Frx*isy-Fry*isx);
Ps=kp*(usx*isx+usy*isy);
Isef=sqrt(0.5*(isx*isx+isy*isy));
Iz=Ps/uc;
us=sqrt(usx*usx+usy*usy);
n=(wm*60)/(2*3.14);
fs10=fs*10;
Fr10=Fr*10;

%yapsat do matice
if(pocitadlo==0)
    fprintf(txt,'%9.5f %9.5f %9.5f %9.5f %9.5f %9.5f %9.5f %9.5f %9.5f
\n',t,M,isa,Fr,n,fs,fs10,Ur,Fr10);
    pocitadlo=999;
end;

pocitadlo=pocitadlo-1;
t=t+T;

end;

TISK()

end

function
[uar,ubr,ucr,B,fs,Ur]=rizeni(B,fs,fsn,fsw,T,Ku,deltaU,Usn,uc,ucp,t,tk)
    if(fs<fsw)
        fs=fs+0.001;
    end;

    B=B+2*3.14*fs*1000*T;

    if(fs<fsn)
        Ur=Ku*fs+deltaU;
    else
        Ur=Usn*sqrt(2);
    end;

    uar=(Ur/ucp)*sin(B);
    ubr=(Ur/ucp)*sin(B-((2*pi)/3));
    ucr=(Ur/ucp)*sin(B-((4*pi)/3));

```

```

end

function TISK()
txt=fopen('vysledek.txt','r');
out = fscanff(txt,'%f %f %f %f %f %f %f %f %f',[9 inf]);
out=out';

figure(1);
[AX,H1,H2]=plotyy(out(:,1),out(:,6),out(:,1),out(:,5),'plot');
set(get(AX(1),'Ylabel'),'String','fs[Hz]')
set(get(AX(2),'Ylabel'),'String','n[ot/min]')
xlabel('t[s]')
legend('n[ot/min]','fs[Hz]')

figure(2);
[AX,H1,H2]=plotyy(out(:,1),out(:,6),out(:,1),out(:,3),'plot');
set(get(AX(1),'Ylabel'),'String','fs[Hz]')
set(get(AX(2),'Ylabel'),'String','isa[A]')
xlabel('t[s]')
legend('isa[A]','fs[Hz]')

figure(3);
[AX,H1,H2]=plotyy(out(:,1),out(:,6),out(:,1),out(:,4),'plot');
set(get(AX(1),'Ylabel'),'String','fs[Hz]')
set(get(AX(2),'Ylabel'),'String','Fr[V]')
xlabel('t[s]')
legend('Fr[V]','fs[Hz]')

figure(4);
[AX,H1,H2]=plotyy(out(:,1),out(:,6),out(:,1),out(:,2),'plot')
set(get(AX(1),'Ylabel'),'String','fs[Hz]')
set(get(AX(2),'Ylabel'),'String','M[Nm]')
xlabel('t[s]')
legend('M[Nm]','fs[Hz]');

figure(5);
[AX,H1,H2]=plotyy(out(:,1),[out(:,6) out(:,8)],out(:,1),out(:,4),'plot')
set(get(AX(1),'Ylabel'),'String','fs[Hz] Us[V]')
set(get(AX(2),'Ylabel'),'String','Fr[V]')
xlabel('t[s]')
legend('Fr[V]','fs[Hz]','Us[V]')

figure(6);
[AX,H1,H2]=plotyy(out(:,1),out(:,2),out(:,1),[out(:,6) out(:,5)],'plot')
set(get(AX(1),'Ylabel'),'String','M[Nm]')
set(get(AX(2),'Ylabel'),'String','fs[Hz] n[ot/min]')
xlabel('t[s]')
legend('fs[Hz]','n[ot/min]','M[Nm]')

```

```
fclose(txt);
end
```

### Příloha C – Simulační program pro obvod s čidlem otáček

```
function simulace()
clear all; %vycisti pamet

txt=fopen('vysledek.txt','w');
odm3=sqrt(3);
%zadani parametru motoru
Rs=0.016;Rr=0.0144;Lh=0.00978;kp=3/2;pp=3; %Rs-cinny odpor
statoru
Lrsig=0.00049;Lssig=0.000454;;J=8; %Rr-cinny odpor rotoru
Lr=Lh+Lrsig;Ls=Lh+Lssig;

%Lh-Prepoctena magnetiyacni indukcnost %Ls-vlastni indukcnost statoru
%pp-pocet polparu %Lr-vlastni indukcnost rotoru
%kp-
%Lrsig-rozptylova indukcnost rotoru %J-moment setrvacnosti na hridel
motoru
%Lssig-rozptzlova indukcnost statoru

%zadani konstant
t=0;T=0.000001;k=0;tk=6;
isx=0;isy=0;disx=0;disy=0;irx=0;iry=0;Frax=0;Fray=0;wm=0;

%vypocet konstant
langda=Lssig+Lrsig*Lh/Lr;
alfa=(Rs+Rr*(Lh*Lh)/(Lr*Lr))/langda;
beta=Rr*(Lh/(Lr*Lr))/langda;
gama=(pp*(Lh/Lr))/langda;
delta=1/langda;
epsilon=(kp*pp*Lh)/(Lr*J);

fs=0;fsn=50;fsw=10;
B=0;

Upm=1;fpwm=8000;
dupily=4*Upm*T*fpwm;
upily=Upm;
uc=560;ucp=uc/2;

Usn=230;deltaU=0.2;Ku=(Usn*sqrt(2))/fsn;
pocitadlo=0;
u10=0;u20=0;u30=0;uar=0;ubr=0;ucr=0;uz1=0;uz2=0;uz3=0;
Kp=0.5;Tr=10;Sk=0;Skp=0;frmax=1;frmin=-1;
np=500;wmw=np*2*3.14/60;
while(t<tk)
    if(t>(tk/2)) %reverzace
        np=-500;wmw=np*2*3.14/60;
    end;
    fm=wm*pp/(2*3.14);
    EPS=(wmw-wm)*(1/(2*3.14));
```

```

fr=Kp*EPS+Sk;
if(fr>frmax)
    fr=frmax;
    Sk=Sk;
elseif(fr<frmin)
    fr=frmin;
    Sk=Sk;
else
    Sk=Sk+(Kp/Tr)*T*EPS;
end;

fs=fm+fr;

Kfr=(Usn*sqrt(2)*Rs)/(fsn*Rr);
%deltaU=Kfr*fr;
%volani funkce rizeni, ktera ma za ukol skalarni rizeni
if(pocitadlo==0)

[uar,ubr,ucr,B,fs,Ur]=rizeni(B,fs,fsn,fsw,T,Ku,Kfr,deltaU,Usn,uc,ucp);

%generovani pwm
end;

if(k==1)
    upily=upily+dupily;
else
    upily=upily-dupily;
end;
if(upily>=Upm)
    k=0;
end;
if(upily<=(-Upm))
    k=1;
end;

%vystup stridace
if(uar>upily)
    u10=ucp;
else
    u10=(-ucp);
end;

%generovani pulzu

if(ubr>upily)
    u20=ucp;
else
    u20=(-ucp);
end;

if(ucr>upily)
    u30=ucp;
else
    u30=(-ucp);
end;

%napeti na zatezi
uz1=(1/3)*(2*u10-u20-u30);
uz2=(1/3)*(2*u20-u10-u30);
uz3=(1/3)*(2*u30-u10-u20);

%prostorovy vektor

```

```

usx=(2/3)*uz1-(1/3)*(uz2+uz3);
usy=(1/sqrt(3))*(uz2-uz3);

%model motoru
disx=-alfa*isx+beta*FrX+gama*wm*Fry+delta*usx;
disy=-alfa*isy-gama*wm*FrX+beta*Fry+delta*usy;
dFrX=Rr*(Lh/Lr)*isx-(Rr/Lr)*FrX-pp*wm*Fry;
dFry=Rr*(Lh/Lr)*isy-(Rr/Lr)*Fry+pp*wm*FrX;
dwm=epsilon*FrX*isy-epsilon*Fry*isx;

%Eulerova metoda
isx=isx+T*disx;
isy=isy+T*disy;
FrX=FrX+T*dFrX;
Fry=Fry+T*dFry;
Fr=sqrt(FrX*FrX+Fry*Fry);
wm=wm+T*dwm;

isa=isx;
isb=-0.5*isx+0.5*odm3*isy;
isc=-0.5*isx-0.5*odm3*isy;
M=pp*kp*(Lh/Lr)*(FrX*isy-Fry*isx);
Ps=kp*(usx*isx+usy*isy);
Isef=sqrt(0.5*(isx*isx+isy*isy));
Iz=Ps/uc;
n=(wm*60)/(2*3.14);
fs10=fs*10;
Fr100=Fr*100;

if(pocitadlo==0)
    fprintf(txt,'%9.5f %9.5f %9.5f %9.5f %9.5f %9.5f %9.5f %9.5f %9.5f
%9.5f %9.5f %9.5f \n',t,M,isa,Fr,wm,n,fs,fr,fr,fs10,Ur,np);
    pocitadlo=999;
end;

pocitadlo=pocitadlo-1;
t=t+T;

end;

TISK()
end

function
[uar,ubr,ucr,B,fs,Ur]=rizeni(B,fs,fsn,fsw,T,Ku,Kfr,deltaU,Usn,uc,ucp)

B=B+2*3.14*fs*1000*T;

if(fs<fsn)
    Ur=abs(Ku*fs+deltaU);
else
    Ur=Usn*sqrt(2);
end;

uar=(Ur/ucp)*sin(B);
ubr=(Ur/ucp)*sin(B-((2*pi)/3));

```

```

ucr=(Ur/ucp)*sin(B-((4*pi)/3));

end

function TISK()
txt=fopen('vysledek.txt','r');

out = fscanf(txt,'%f %f %f %f %f %f %f %f %f %f %f %f',[12 inf]);
out=out';

figure(1);
[AX,H1,H2]=plotyy(out(:,1),out(:,3),out(:,1),out(:,7),'plot');
set(get(AX(1),'Ylabel'),'String','isa[A]')
set(get(AX(2),'Ylabel'),'String','fs[Hz]')
xlabel('t[s]')
legend('fs[Hz]','isa[A]')

figure(2);
[AX,H1,H2]=plotyy(out(:,1),out(:,4),out(:,1),out(:,7),'plot');
set(get(AX(1),'Ylabel'),'String','Fr[V]')
set(get(AX(2),'Ylabel'),'String','fs[Hz]')
xlabel('t[s]')
legend('fs[Hz]','Fr[V]')

figure(3);
[AX,H1,H2]=plotyy(out(:,1),out(:,2),out(:,1),out(:,7),'plot');
set(get(AX(1),'Ylabel'),'String','M[Nm]')
set(get(AX(2),'Ylabel'),'String','fs[Hz]')
xlabel('t[s]')
legend('fs[Hz]','M[Nm]')

figure(4);
[AX,H1,H2]=plotyy(out(:,1),out(:,4),out(:,1),[out(:,7) out(:,11)],'plot');
set(get(AX(1),'Ylabel'),'String','Fr[V]')
set(get(AX(2),'Ylabel'),'String','fs[Hz] Us[V]')
xlabel('t[s]')
legend('fs[Hz]','Us[V]','Fr[V]')

figure(5)
[AX,H1,H2]=plotyy(out(:,1),out(:,2),out(:,1),[out(:,7) out(:,6)
out(:,12)],'plot')
set(get(AX(1),'Ylabel'),'String','M[Nm]')
set(get(AX(2),'Ylabel'),'String','fs[Hz] n[ot/min]')
xlabel('t[s]')
legend('fs[Hz]','n[ot/min]','nw[ot/min]','M[Nm]')

fclose(txt);
end

```