

MATEMATICKÝ MODEL ASYNCHRONNÍHO STROJE S NAPÁJENÝM ROTOREM

Ing. Milan Sedláček

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky, ZČU Plzeň

Anotace

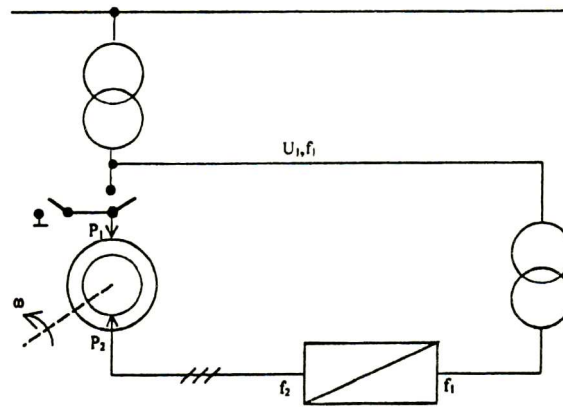
Matematické modelování za pomoci výpočetní techniky je perspektivní, dynamicky se rozvíjející disciplínou v jinak tradičním oboru elektrických strojů. Předložená práce je zaměřena na matematické modelování ustálených a přechodných stavů asynchronního motoru s napájeným rotorem. Modely vycházejí z popisu stroje soustavou diferenciálních rovnic, která je následně řešena pomocí programu Simulink. Celá práce je zaměřena na použití dvojitě napájeného asynchronního stroje v přečerpávací vodní elektrárně, čemuž jsou přizpůsobeny především simulace a charakter zátěže.

1 Úvod

Asynchronní stroj s dvojitým napájením se používá především z důvodu možnosti řízení rychlosti změnou frekvence napětí v rotorovém obvodu. Možnost řízení otáček je omezena na pásmo rychlostí blízké synchronní, protože konstrukce tohoto stroje neumožňuje provozovat stroj v otáčkách výrazně odlišných od synchronních s vysokou účinností. Obecně je ale možné stroj provozovat i při větším rozsahu rychlostí, ovšem s odpovídajícím měničem. Toto řízení otáček se tedy uplatní v případech, kdy jsou potřebné přesné otáčky nebo v případech, kdy se zátěžný moment a tedy i výkon silně mění v závislosti na otáčkách např. ve spojení s čerpadly a turbínami.

2 Princip regulace výkonu a otáček

Přečerpávací vodní elektrárny se v praxi osvědčily jako pohotovostní zásobníky energie. Při výkonových špičkách dodávají elektrinu do sítě a při přebytku ji akumulují. Velké jednotky dosahují účinnosti přeměn přes 85%. Tuto účinnost je možno dále významně zvýšit, jsou-li otáčky soustrojí regulovatelné. V turbinovém chodu je regulační rozsah otáček omezen kavitací, v čerpadlovém režimu případně též maximálním výkonem. Otáčky se proto regulují v omezeném rozsahu, zpravidla nejvýše $\pm 10\%$ od jmenovité hodnoty ω_s (synchronní úhlová rychlost točivého pole buzeného statorem). S tím úzce souvisí výběr koncepce elektrické regulační soustavy a volba typu motor-generátoru. V praxi se osvědčil dvojitě napájený indukční stroj, v jehož rotorovém obvodu je zapojen frekvenční měnič, obr. 1. Výkon měniče je dán v zásadě rozsahem otáček. Vzhledem k omezenému rozsahu provozních otáček se pohybuje frekvence na výstupu statického měniče v rozmezí 0 – 5 Hz. Přítomnost frekvenčního měniče lze současně využít pro rozběh do čerpadlového režimu. Měnič lze přesně řídit pomocí regulátoru proudu. Do rotoru je vnucován proud vhodné amplitudy, frekvence, sledu fází a fázového posunu vůči magnetickému toku statoru. Řízení je zpravidla realizováno jako vektorové s nezávislou regulací činného a jalového výkonu. Jak v čerpadlovém, tak i v motorickém provozu lze nastavit požadovaný činný i jalový výkon nezávisle na žádanou velikost.



Obr. 1 – Principiální schéma

Omezujícím činitelem je požadavek, aby proudy statoru a rotoru nepřesáhly maximální stanovené mezní hodnoty. Další omezení je dáno velikostí rotorového napětí a kmitočtu. U čerpadlových turbín Francisova typu lze příkon v čerpadlovém provozu měnit prakticky pouze změnou otáček. Činný výkon je teoreticky úměrný třetí mocnině otáček.

Regulačnímu pásmu $\pm 10\% \omega_s$, tedy odpovídá rozsah příkonu v čerpadlovém režimu $\pm 33\%$, což je využitelné při náhlých změnách zátěže.

Přínosy říditelných otáček jsou následující:

- Rychlá regulace příkonu v čerpadlovém režimu podle okamžitých potřeb sítě
- Vyšší účinnost v turbinovém provozu, nižší kavitace a chvění
- Možnost řízení frekvence sítě
- Zvýšená dynamická stabilita soustavy
- Rychlý a ekonomický frekvenční rozběh
- Širší provozní rozsah a efektivnější využití akumulované energie vody (provoz při nižším spádu)
- Výrazné prodloužení provozní doby (zkušenosti z provozu rekonstruovaných jednotek 395 MVA v Okawachi)

Určitou nevýhodou je pouze větší složitost a vyšší cena zařízení.

3 Základní vlastnosti asynchronního stroje s dvojím napájením

Principiální uspořádání tohoto stroje je uvedeno na obr. 2. Vlastnosti v ustáleném stavu můžeme ukázat na náhradním schématu (obr. 3).

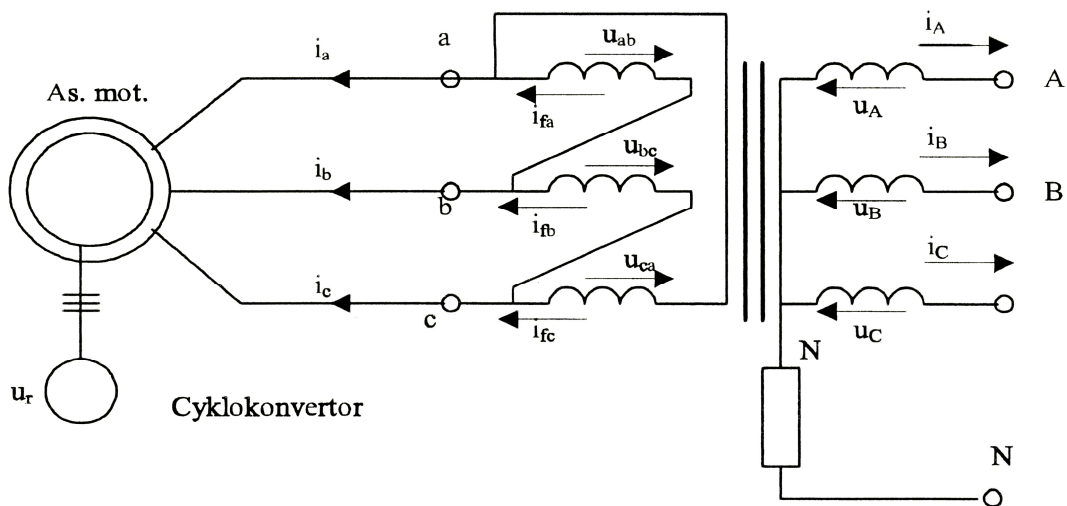
O rotorovém zdroji předpokládáme, že jeho kmitočet f_2 vždy koresponduje s relací

$$f_2 = s \cdot f_1$$

$$s = \frac{f_1 - f \cdot p}{f_1}, \quad (1)$$

když f jsou sekundové otáčky stroje a p počet pólových dvojic. Z podmínky $k=1$ plyne, že platí

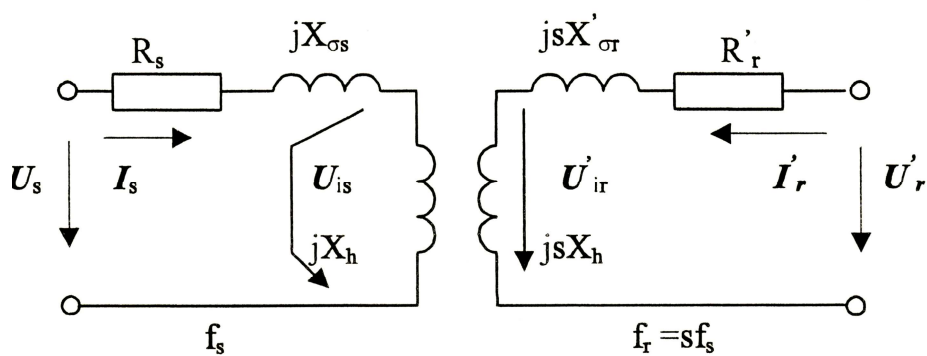
$$\frac{U_{is}}{U_{ir0}} = 1 \text{ pro } s = 1 \text{ a } X_{h1} = X_{h2} = X_h \quad (2)$$



Obr. 2 – Základní uspořádání stroje s dvojitým napájením včetně blokového transformátoru

Platí následující napěťové rovnice

$$\begin{aligned}
 \mathbf{U}_s &= (R_s + jX_s)\mathbf{I}_s + jX_h\mathbf{I}_r \\
 \mathbf{U}_r &= jsX_h\mathbf{I}_s + (R_r + jsX_r)\mathbf{I}_r \\
 X_s &= X_{s\sigma} + X_h \\
 X_r &= X_{r\sigma} + X_h
 \end{aligned}
 \tag{3}$$



Obr.3 – Obvodové schéma asynchronního stroje s dvojitým napájením. (Předpokládáme stroj převedený na jednotkový převod.)

4 Matematický model asynchronního stroje

$$\overline{u}_S^S = R_S \overline{i}_S^S + \frac{d\overline{\Psi}_S^S}{dt} \quad (\text{statorový souřadný systém}) \quad (4)$$

$$\overline{u}_R^R = R_R \overline{i}_R^R + \frac{d\overline{\Psi}_R^R}{dt} \quad (\text{rotorový souřadný systém}) \quad (5)$$

Transformace z rotorového souřadného systému do statorového souřadného systému .

$$\overline{u}_R^S \cdot e^{-j\vartheta} = R_R \overline{i}_R^S \cdot e^{-j\vartheta} + \frac{d}{dt} \left(\overline{\Psi}_R^S \cdot e^{-j\vartheta} \right) \quad (6)$$

$$\overline{u}_R^S \cdot e^{-j\vartheta} = R_R \overline{i}_R^S \cdot e^{-j\vartheta} + \frac{d\overline{\Psi}_R^S}{dt} e^{-j\vartheta} - j \frac{d\vartheta}{dt} e^{-j\vartheta} \overline{\Psi}_R^S \quad (7)$$

$$\overline{u}_R^S = R_R \overline{i}_R^S + \frac{d\overline{\Psi}_R^S}{dt} - j\omega_{el} \overline{\Psi}_R^S \quad - \text{souřadný systém statoru} \quad (8)$$

Transformace do α, β souřadnic (spojených se statorem).

$$\begin{aligned} u_{S\alpha} &= R_S i_{S\alpha} + \frac{d\Psi_{S\alpha}}{dt} \\ u_{S\beta} &= R_S i_{S\beta} + \frac{d\Psi_{S\beta}}{dt} \\ u_{R\alpha} &= R_R i_{R\alpha} + \frac{d\Psi_{R\alpha}}{dt} + \omega_{el} \Psi_{R\beta} \\ u_{R\beta} &= R_R i_{R\beta} + \frac{d\Psi_{R\beta}}{dt} - \omega_{el} \Psi_{R\alpha} \end{aligned} \quad (9)$$

Rovnice pro elektromagnetický moment

$$M_{elmag} = \frac{3}{2} p \cdot L_h \cdot \text{Re} \left\{ j \cdot \overline{i}_R \overline{i}_S^* \right\} \quad (10)$$

$$M_{elmag} = \frac{3}{2} p \cdot L_h (i_{S\beta} \cdot i_{R\alpha} - i_{S\alpha} \cdot i_{R\beta}) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} (M_{elmag} - M_Z) &= J \frac{d\omega_{mech}}{dt} \\ M_{elmag} - M_Z &= \frac{J}{p} \cdot \frac{d\omega_{el}}{dt} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\omega_{mech} = \frac{d\omega_{el}}{p}$$

Doplňkové rovnice

$$\begin{aligned}\Psi_{S\alpha} &= L_S i_{S\alpha} + L_h i_{R\alpha} \\ \Psi_{S\beta} &= L_S i_{S\beta} + L_h i_{R\beta} \\ \Psi_{R\alpha} &= L_R i_{R\alpha} + L_h i_{S\alpha} \\ \Psi_{R\beta} &= L_R i_{R\beta} + L_h i_{S\beta}\end{aligned}\tag{13}$$

Vstupní napětí

$$\begin{aligned}\overline{u_S} &= \frac{2}{3} (u_A + a \cdot u_B + a^2 \cdot u_C) \\ u_{S\alpha} &= \operatorname{Re}\{u_S\} \\ u_{S\beta} &= \operatorname{Im}\{u_S\}\end{aligned}\quad ; \text{ kde } a = e^{j\frac{2\pi}{3}}, a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}\tag{14}$$

Úprava rovnic pro použití v metodě snižování řádu derivace

$$\begin{aligned}u_{S\alpha} &= R_S i_{S\alpha} + L_S \frac{di_{S\alpha}}{dt} + L_h \frac{di_{R\alpha}}{dt} \\ \frac{di_{S\alpha}}{dt} &= \frac{1}{L_S} \left[u_{S\alpha} - R_S i_{S\alpha} - L_h \frac{di_{R\alpha}}{dt} \right]\end{aligned}\tag{15}$$

$$\begin{aligned}u_{S\beta} &= R_S i_{S\beta} + L_S \frac{di_{S\beta}}{dt} + L_h \frac{di_{R\beta}}{dt} \\ \frac{di_{S\beta}}{dt} &= \frac{1}{L_S} \left[u_{S\beta} - R_S i_{S\beta} - L_h \frac{di_{R\beta}}{dt} \right]\end{aligned}\tag{16}$$

$$\begin{aligned}u_{R\alpha} &= R_R i_{R\alpha} + L_R \frac{di_{R\alpha}}{dt} + L_h \frac{di_{S\alpha}}{dt} + \omega_{el} (L_R i_{R\beta} + L_h i_{S\beta}) \\ \frac{di_{R\alpha}}{dt} &= \frac{1}{L_R} \left[u_{R\alpha} - R_R i_{R\alpha} - L_h \frac{di_{S\alpha}}{dt} - \omega_{el} L_R i_{R\beta} - \omega_{el} L_h i_{S\beta} \right]\end{aligned}\tag{17}$$

$$\begin{aligned}u_{R\beta} &= R_R i_{R\beta} + L_R \frac{di_{R\beta}}{dt} + L_h \frac{di_{S\beta}}{dt} - \omega_{el} (L_R i_{R\alpha} + L_h i_{S\alpha}) \\ \frac{di_{R\beta}}{dt} &= \frac{1}{L_R} \left[u_{R\beta} - R_R i_{R\beta} - L_h \frac{di_{S\beta}}{dt} + \omega_{el} L_R i_{R\alpha} + \omega_{el} L_h i_{S\alpha} \right]\end{aligned}\tag{18}$$

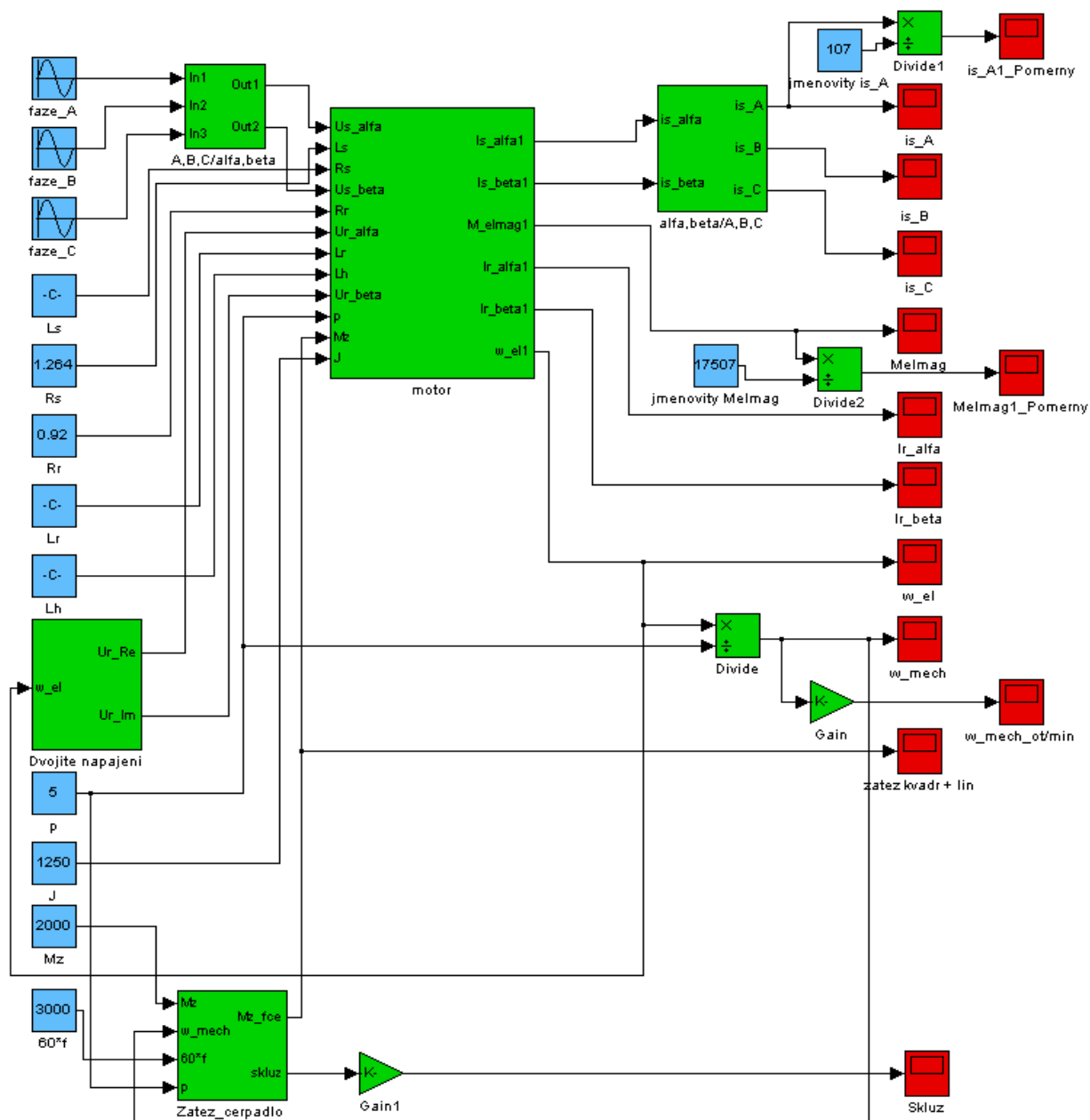
5 Model stroje v programu Simulink

Pro model stroje v programu Matlab Simulink byly použity rovnice upravené do tvaru vhodném pro metodu snižování řádu derivace. Pro složitost modelu a lepší přehlednost je hlavní model složen z pěti dílčích subsystémů (modelů).

5.1 Hlavní model

Blok hlavního modelu se skládá ze subsystémů

- 1) A,B,C/alfa,beta – převod třífázového systému napájení na systém souřadnic α, β .
- 2) Motor – subsystém samotného modelu stroje podle rovnic uvedených výše.
- 3) Alfa,beta/A,B,C – převod systému napájení α, β na třífázový systém.
- 4) Dvojitě napájení – subsystém realizující napájení do rotoru.
- 5) Zátěž čerpadlo – blok realizuje kombinovanou zátěž představující čerpání vody v přečerpávací vodní elektrárně.

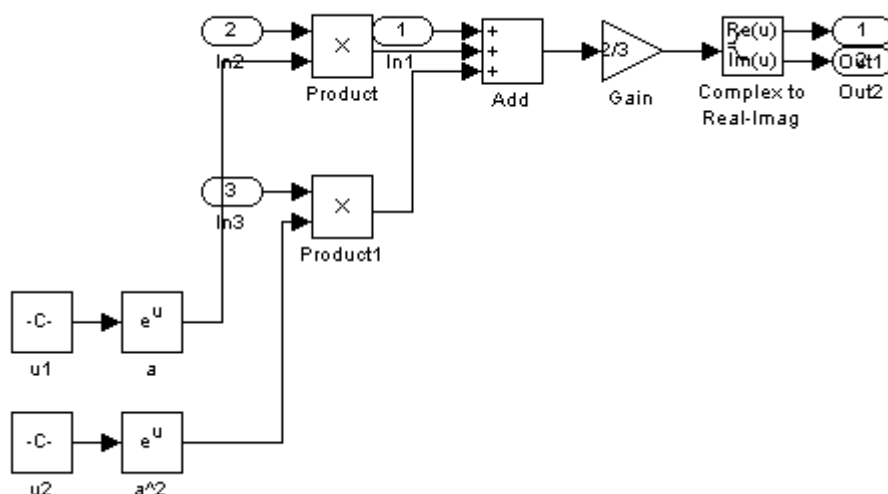


Obr. 4 – Hlavní model asynchronního stroje s dvojitým napájením.

5.2 Blok A,B,C/alfa,beta

Blok zajišťuje transformaci napětí z třífázového systému A,B,C na napájecí systém souřadnic α,β podle rovnic:

$$\begin{aligned} \overline{U}_S &= \frac{2}{3}(U_A + a \cdot U_B + a^2 \cdot U_C) \\ U_{S\alpha} &= \operatorname{Re}\{U_S\} \\ U_{S\beta} &= \operatorname{Im}\{U_S\} \end{aligned} \quad ; \text{ kde } a = e^{j\frac{2\pi}{3}}, a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} \quad (19)$$

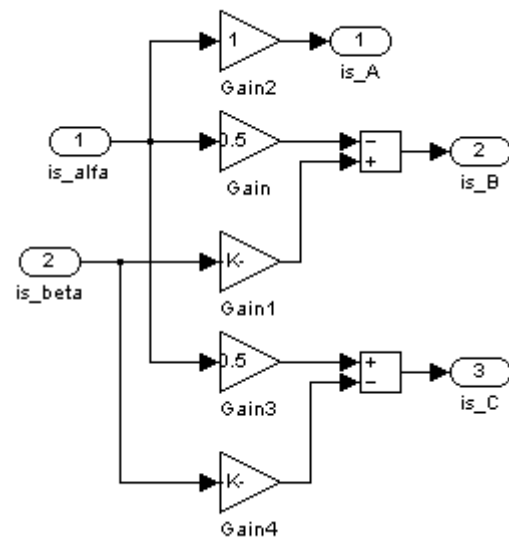


Obr. 5 – Blok transformace napětí z třífázového systému A,B,C na napájecí systém souřadnic α,β .

5.3 Blok alfa,beta/A,B,C

Tento subsystem zajišťuje zpětnou transformaci souřadnic α,β na souřadnice A,B,C, tak aby byly vhodné pro měření. Přepočít je podle následujících vztahů:

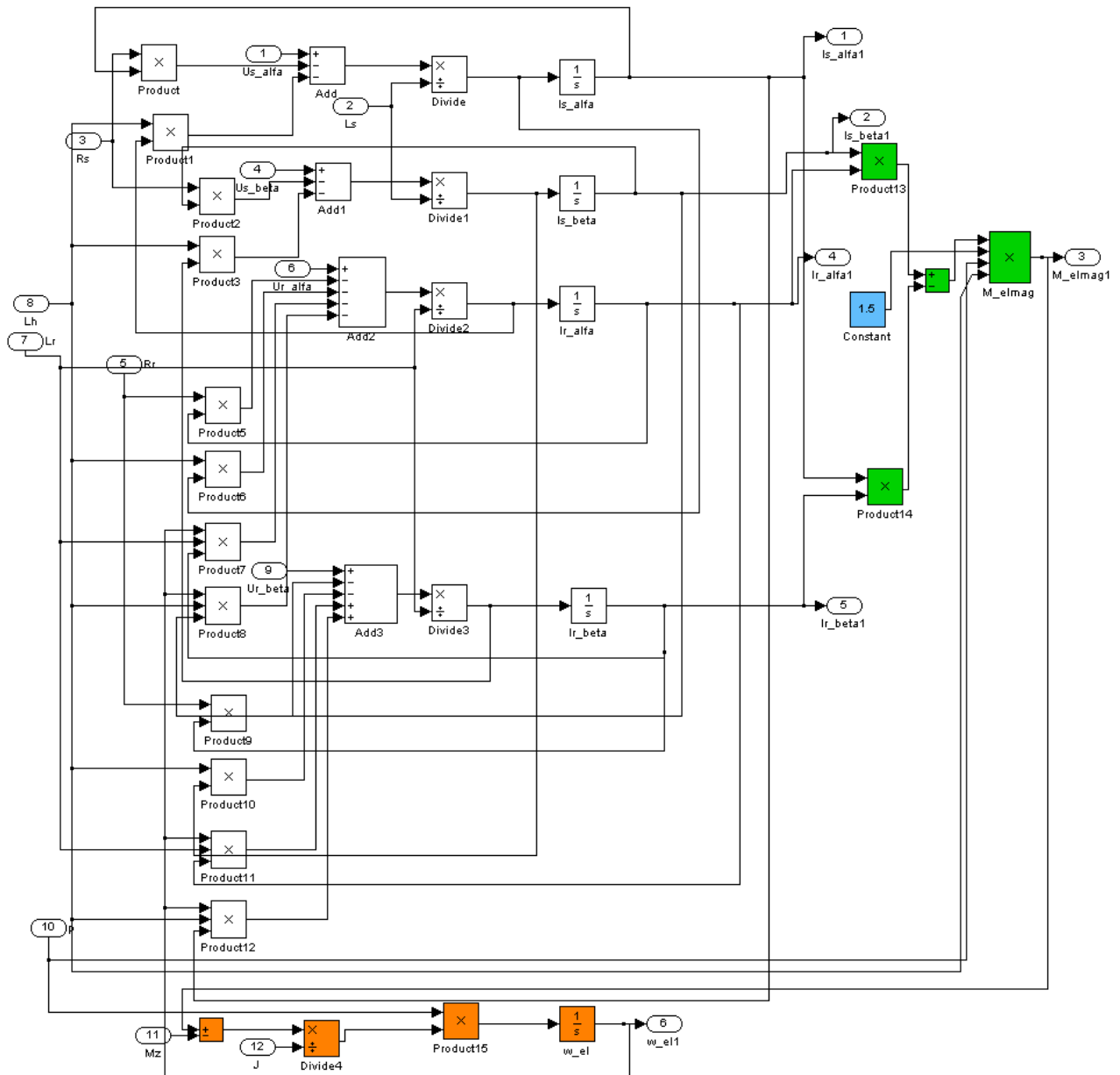
$$\begin{aligned} I_{SA} &= \operatorname{Re}\{I_S\} = I_{S\alpha} \\ I_{SB} &= -\frac{1}{2}\operatorname{Re}\{I_S\} + \frac{\sqrt{3}}{2}\operatorname{Im}\{I_S\}, \text{ kde } \begin{cases} \operatorname{Re}\{I_S\} = I_{S\alpha} \\ \operatorname{Im}\{I_S\} = I_{S\beta} \end{cases} \\ I_{SC} &= \frac{1}{2}\operatorname{Re}\{I_S\} - \frac{\sqrt{3}}{2}\operatorname{Im}\{I_S\} \end{aligned} \quad (20)$$



Obr. 6 – Blok zpětné transformace souřadnic α, β na souřadnice A, B, C.

5.4 Blok samotného stroje

Blok Motor realizuje podle výše uvedených rovnic samotný model asynchronního stroje. Regulaci pomocí napájení do rotoru však tento blok neobsahuje, ale je uzavřena v samostatném subsystému s názvem Dvojité napájení.



Obr. 7 – Blok asynchronního stroje

5.5 Blok dvojité napájení

Blok Dvojité napájení zajišťuje výpočet napětí, které je vedeno přes kartáče do rotoru stroje, je-li právě používána regulace otáček dvojitě napájeného stroje. Výpočet je založen na principu následujících rovnic:

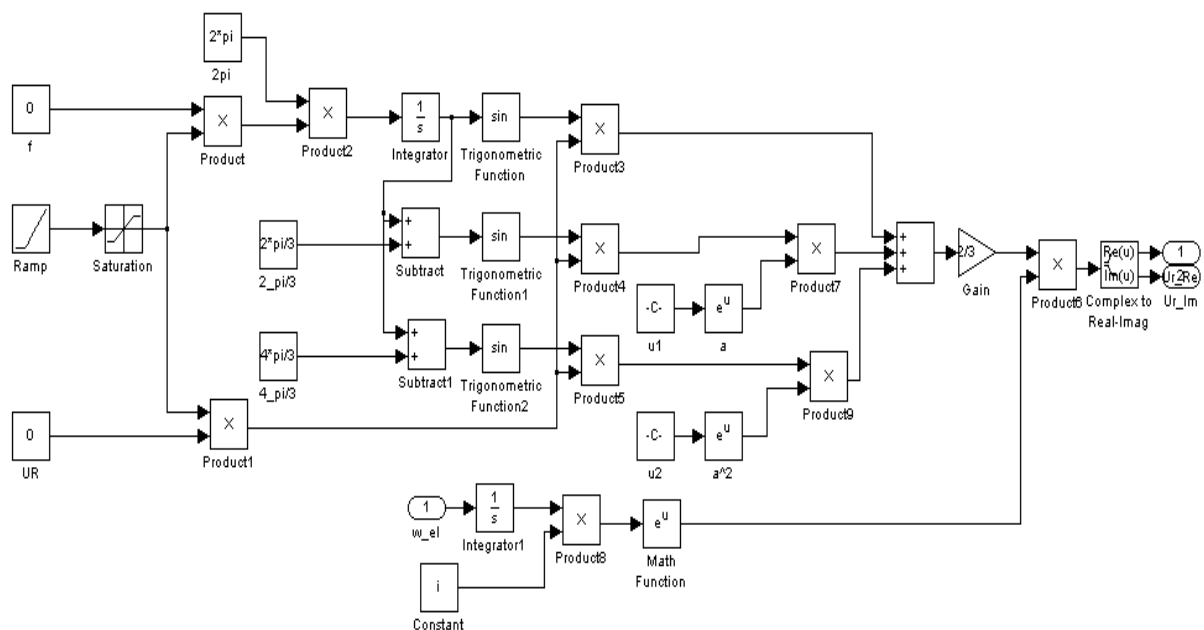
$$U_{\alpha} = U_{MAX} \cdot \cos \varphi$$

$$U_{\alpha} = U_{MAX} \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}$$

(21)

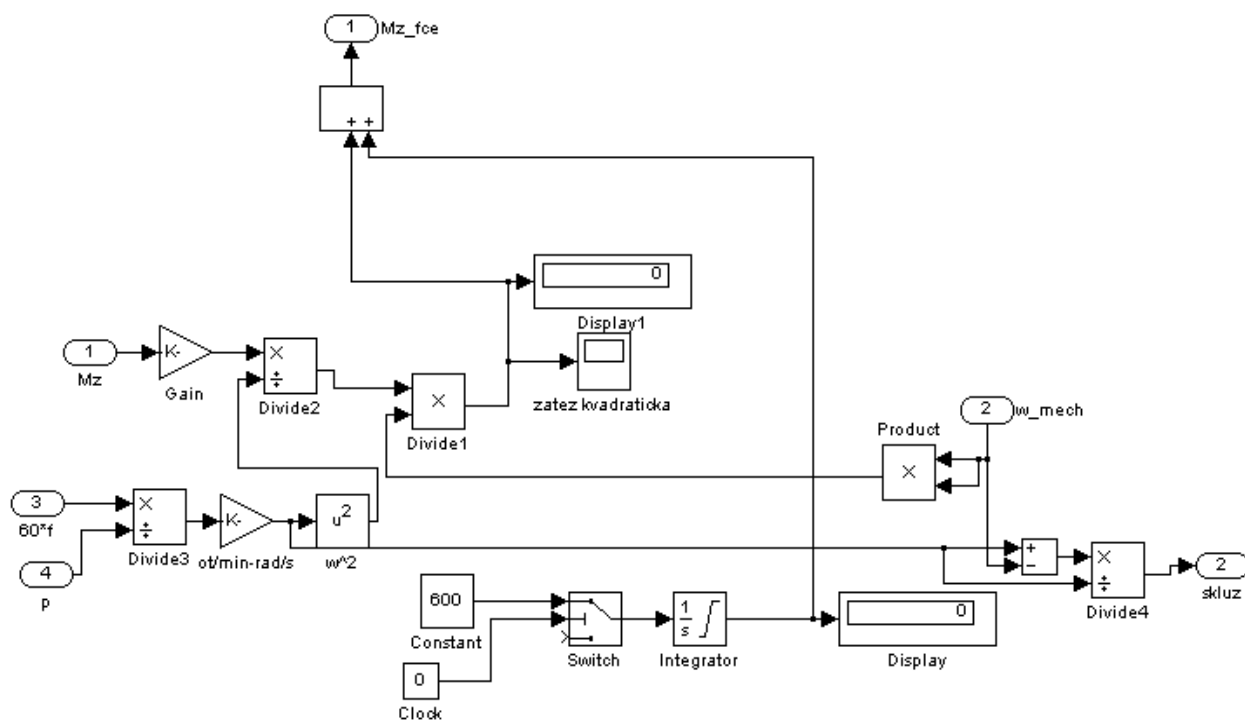
$$\varphi = \int \omega \cdot dt$$



Obr. 8 – Blok dvojitého napájení (do rotoru).

5.6 Blok zátěž čerpadlo

System simuluje zátěž při čerpání vody v přečerpávací vodní elektrárně. V první fázi se motor rozbíhá naprázdno a blok simuluje ventilační ztráty, které jsou 2 % ze zátěžného momentu (M_z) a mají kvadratický nárůst. V druhé fázi se začne do prostoru turbíny (čerpadla) napouštět voda a zátěž lineárně narůstá až do hodnoty 100% M_z . Hodnoty M_z , strmost obou zátěží lze volit podle potřeby.

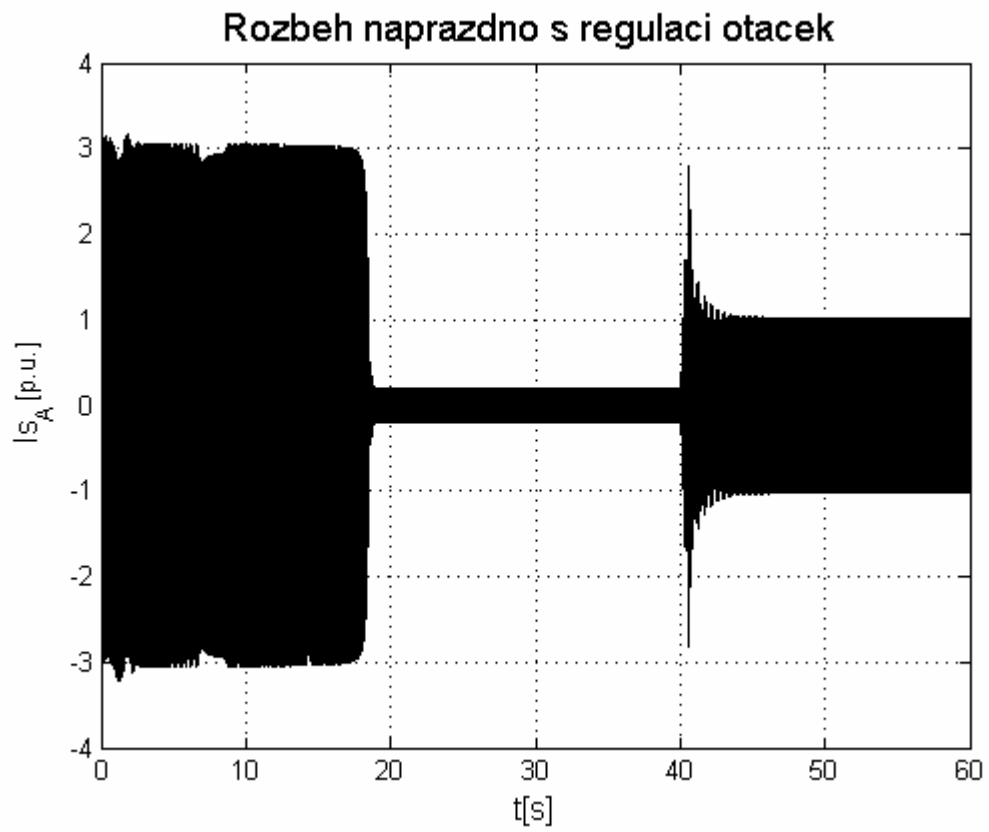


Obr. 9 – Blok zátěže simulující čerpání vody.

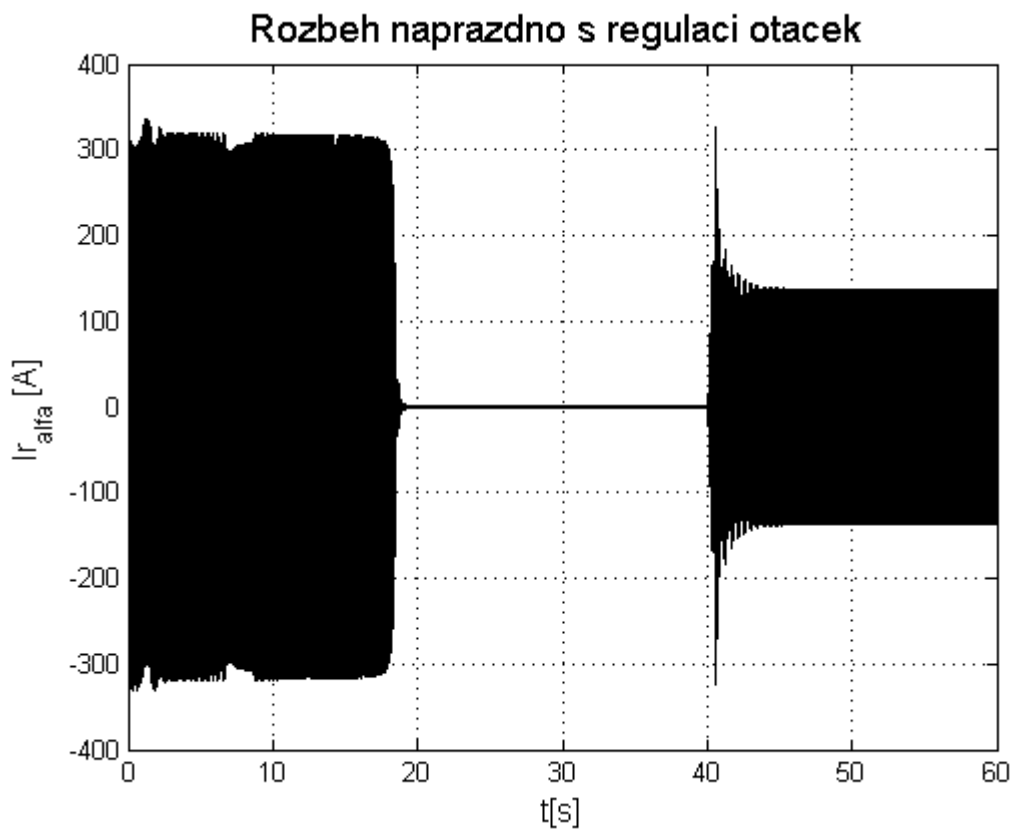
6 Simulace

6.1 Regulace otáček napětím do rotoru naprázdno

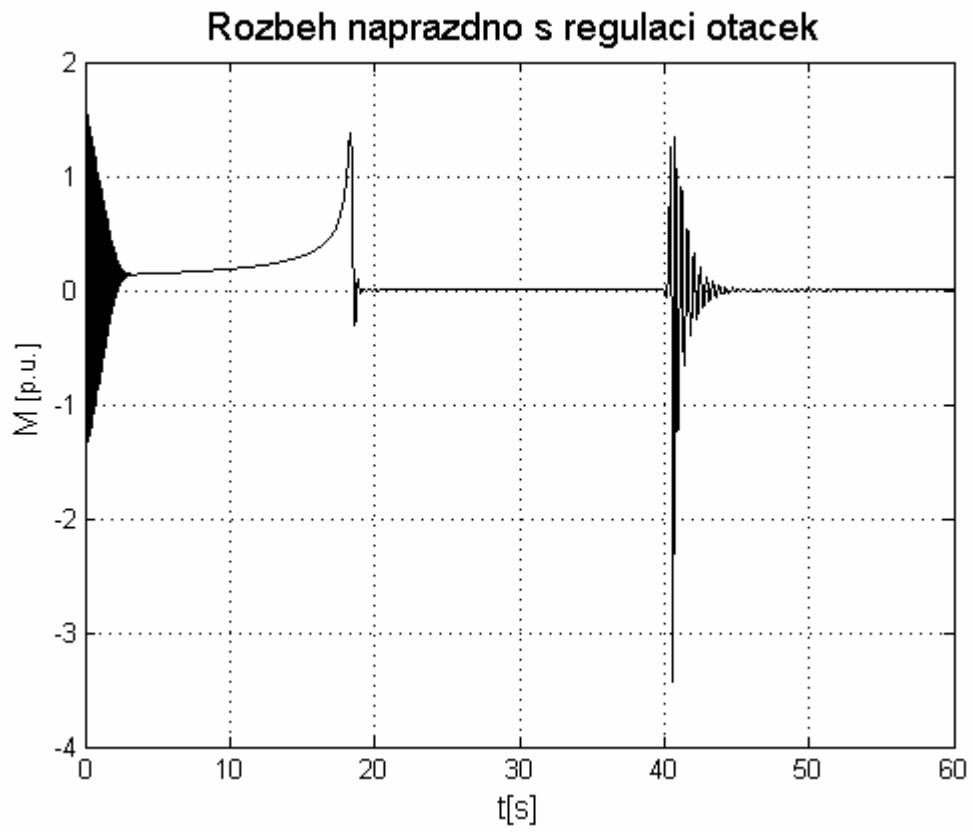
Při této simulaci byl nejprve modelován rozběh nezátíženého motoru, jako v předchozím případě. Po ustálení na jmenovitých otáčkách byla použita regulace rychlosti pomocí napájení do rotoru, která vedla ke snížení otáček o 5 %.



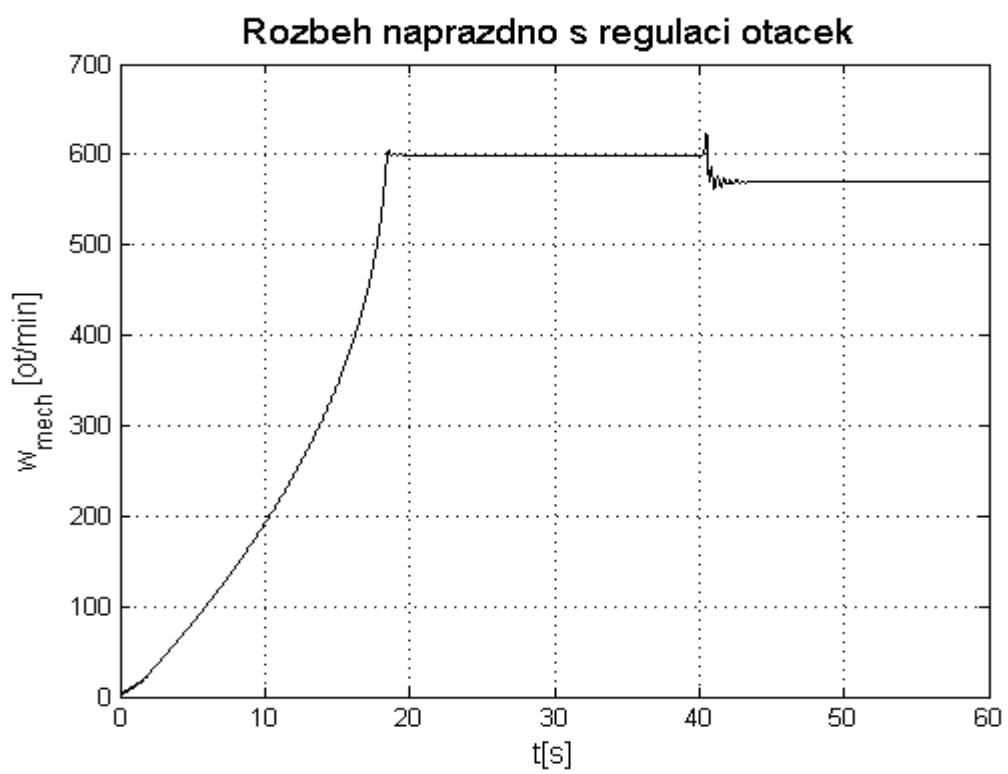
Obr. 10



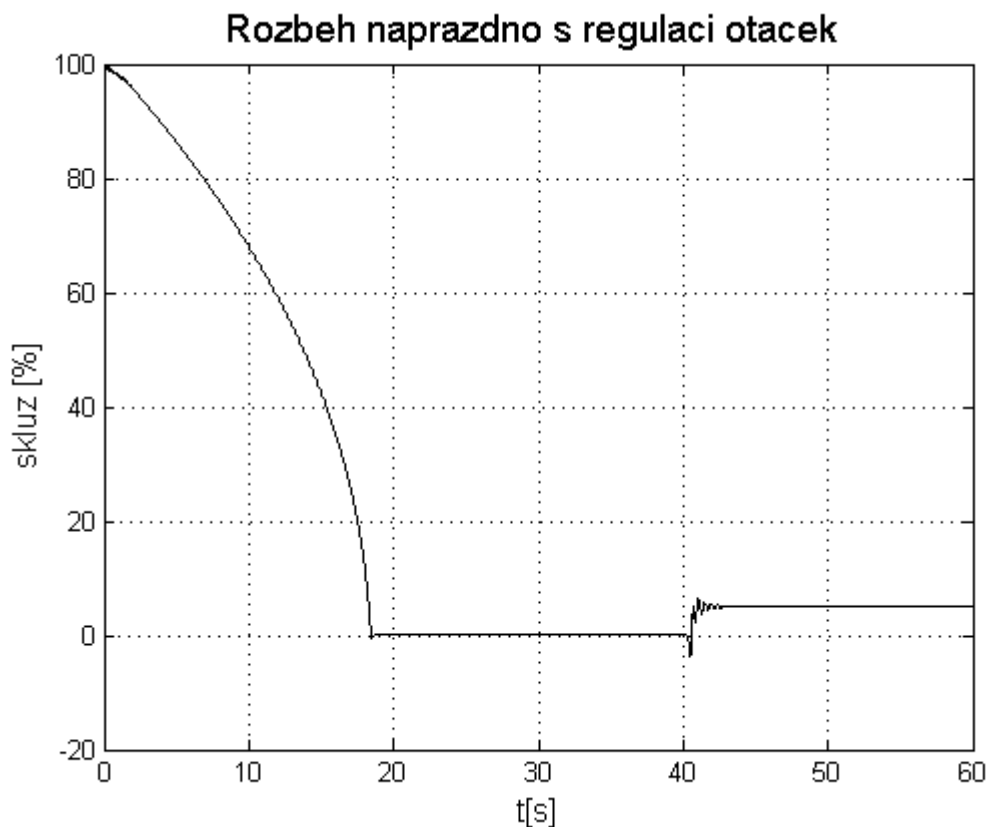
Obr. 11



Obr. 12



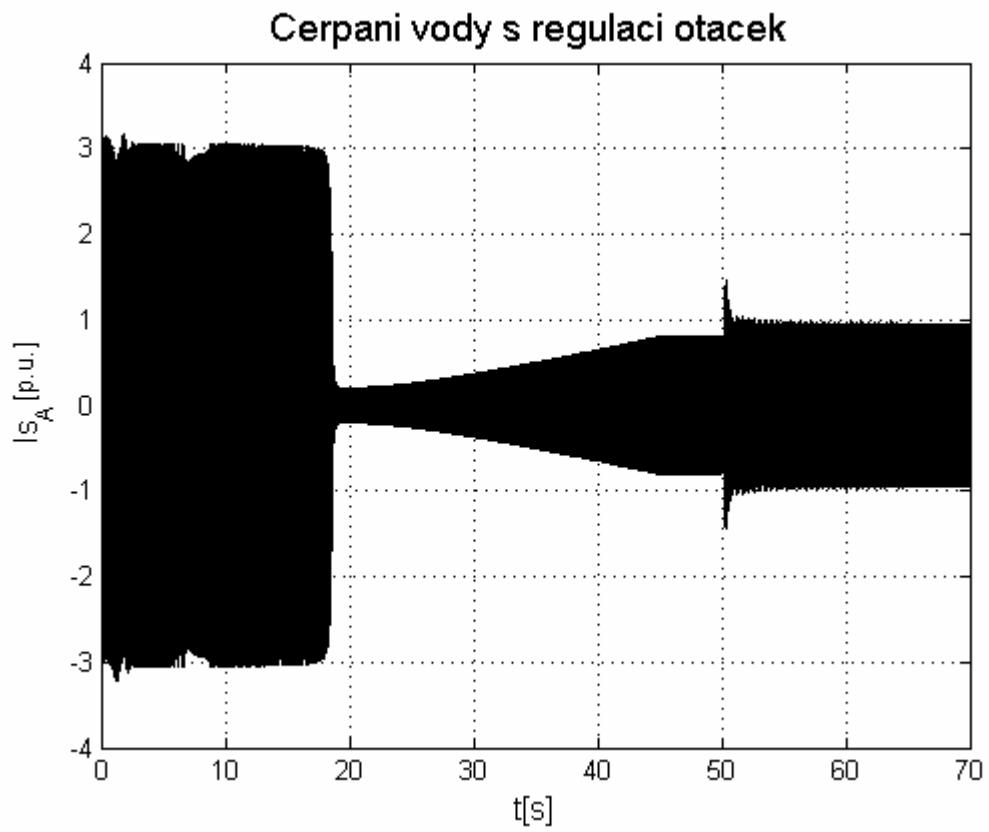
Obr. 13



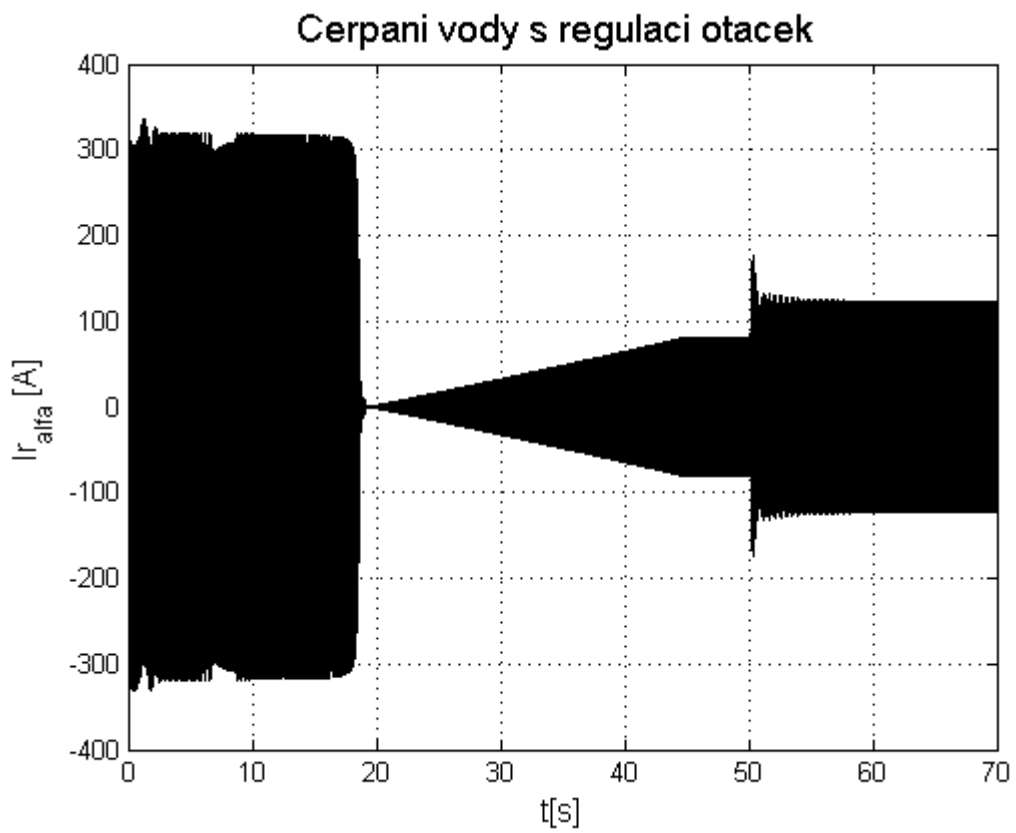
Obr. 14

6.2 Rozběh stroje při čerpání vody s regulací otáček

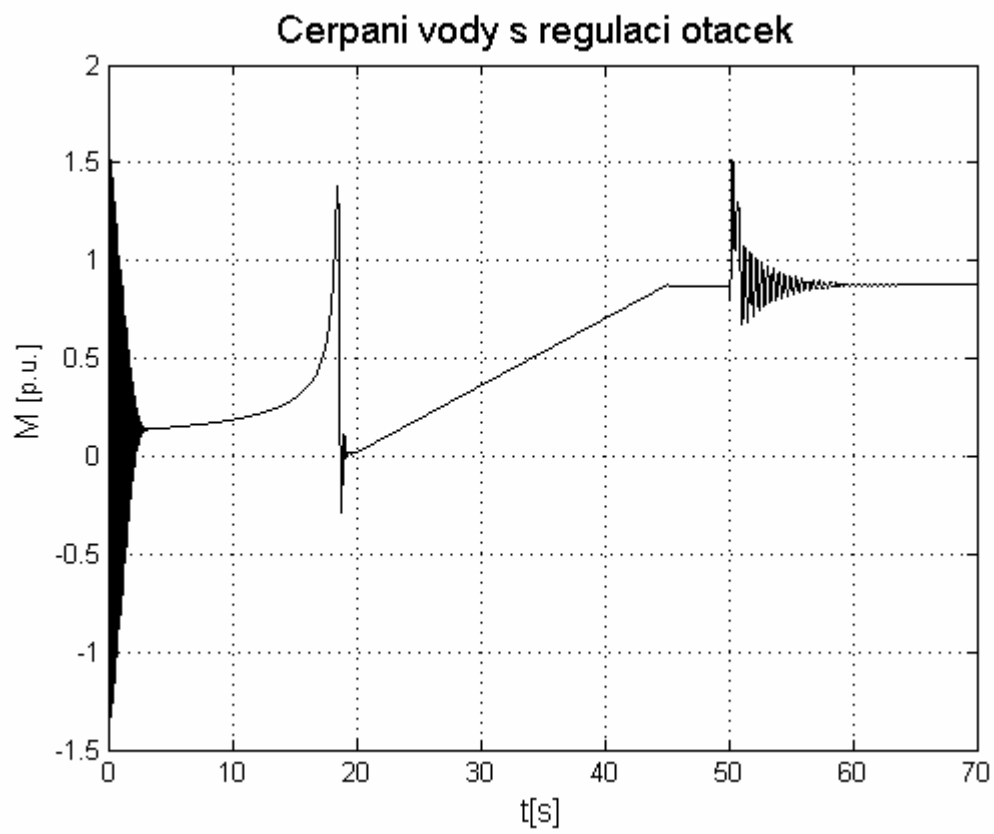
V této simulaci bylo použito zátěže, která představuje cyklus čerpání vody v přečerpávací vodní elektrárně. Nejprve dojde k rozběhu stroje, který je zatěžován po kvadratické křivce pouze ventilačními ztrátami, které tvoří 2% z celkové zátěže. Po rozběhu stroje začíná zátěž lineárně narůstat až do maximální hodnoty, což simuluje zaplavení prostoru čerpadla vodou. U elektráren s velkým výkonem trvá tento cyklus řádově minuty. V tomto případě bylo z praktických důvodů použito kratších časů, ale princip se nemění. V závěru simulace dochází, již při plném zatížení, k zvýšení otáček o 5% pomocí napájení do rotoru. Maximální zátěžný moment v tomto případě je $M_{z_{MAX}}=15\ 000\ \text{Nm}$.



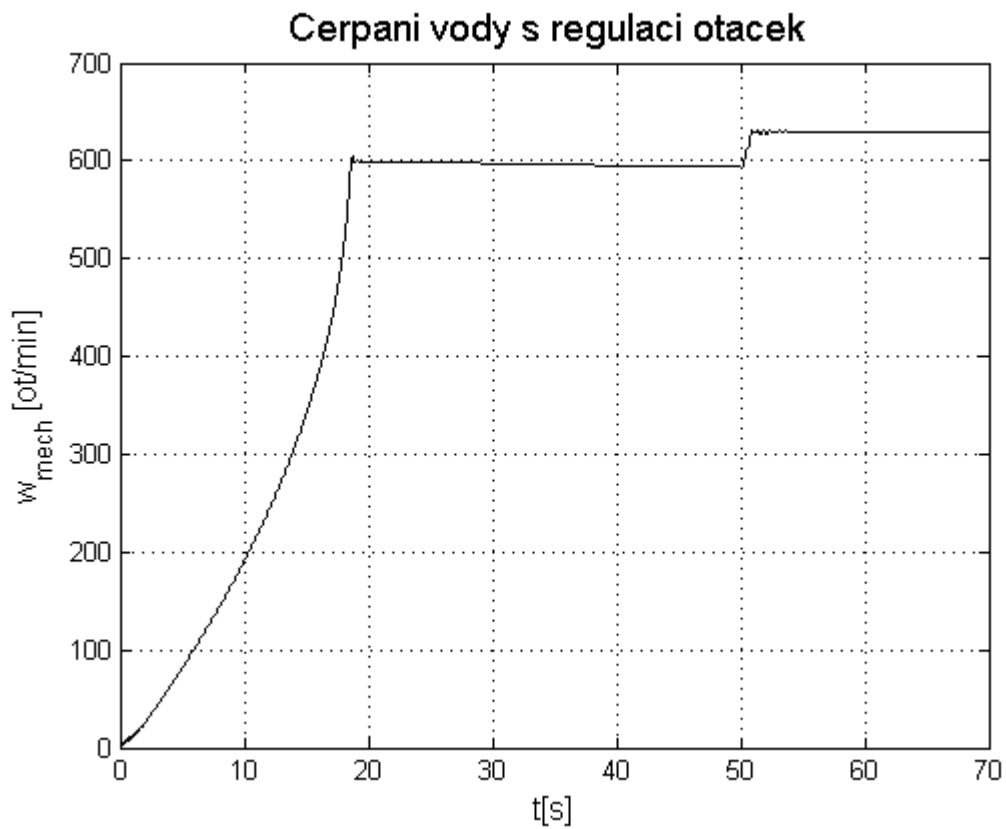
Obr. 15



Obr. 16



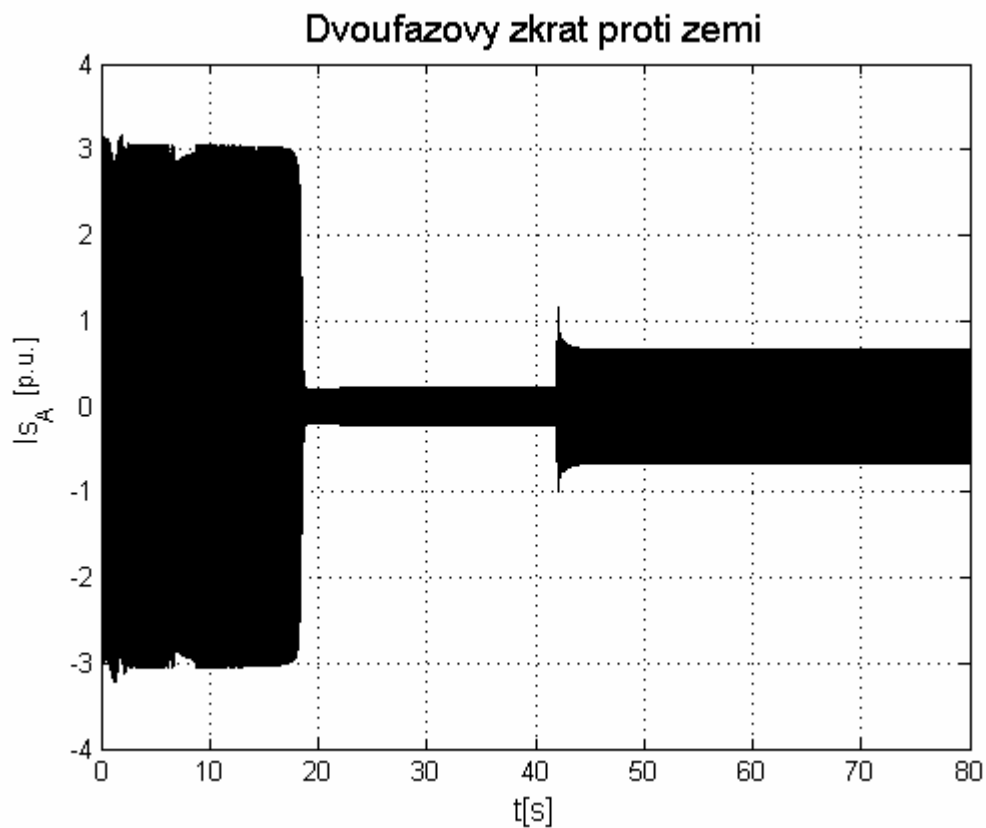
Obr. 17



Obr. 18

6.3 Dvoufázový zkrat proti zemi

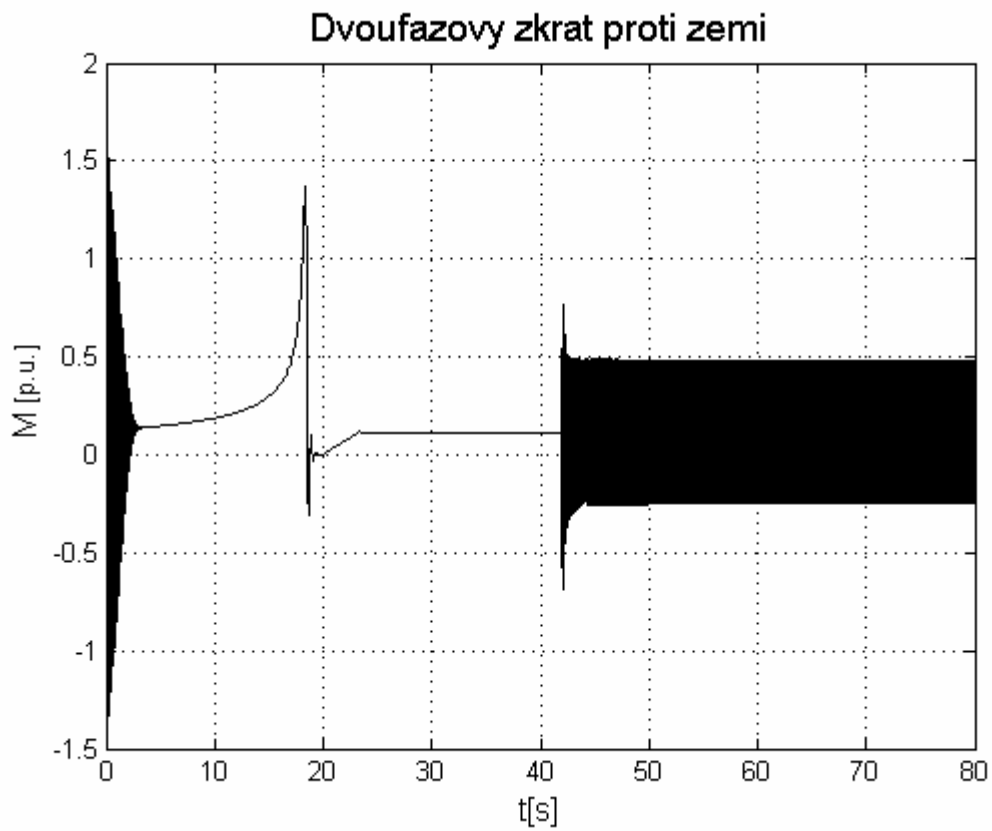
V tomto případě byl modelován zkrat dvou fází statoru proti zemi. Aby po zkratu nedošlo k zastavení motoru, byl použit maximální zátěžný moment pouze $M_z = 2000\text{Nm}$. Na obr. 23 je vidět deformace kruhového točivého pole stroje při zkratu. Na vodorovné ose je reálná a na svislé ose je imaginární část napájecího napětí.



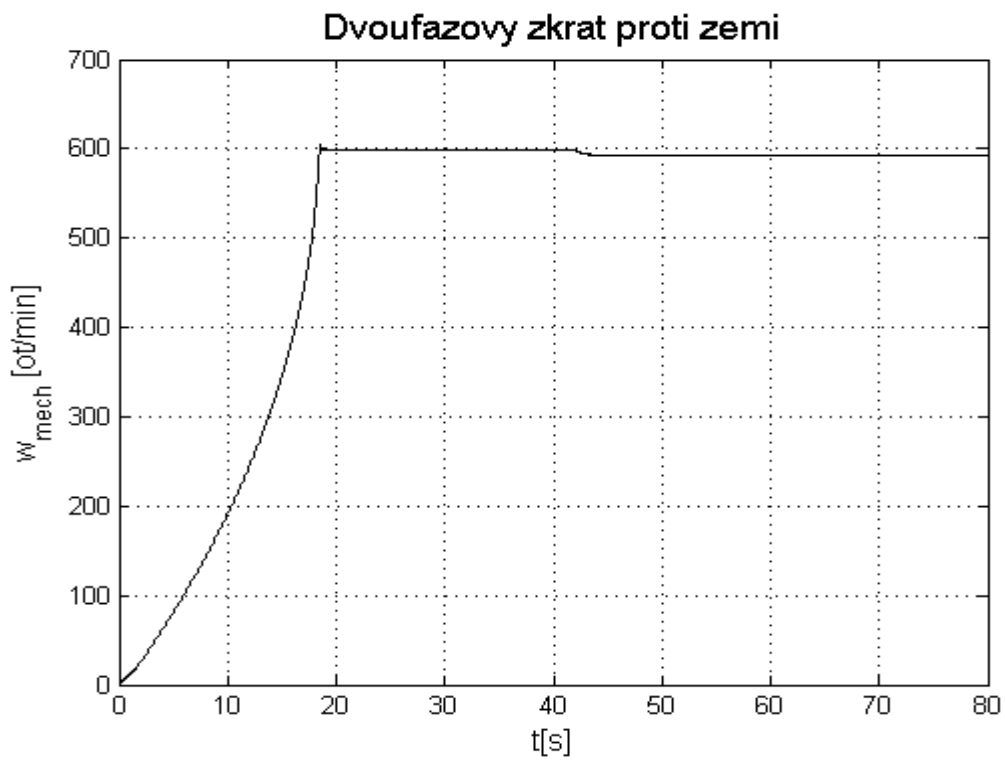
Obr. 19



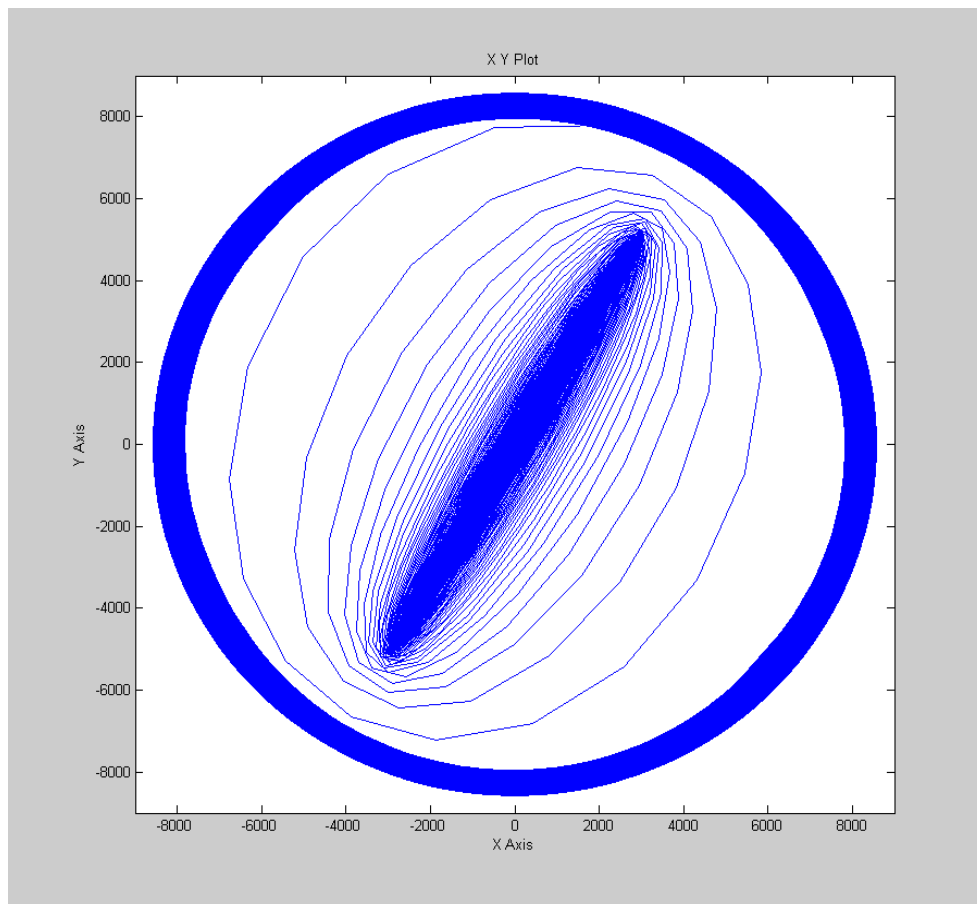
Obr. 20



Obr. 21



Obr. 22



Obr. 23 - Deformace točivého pole stroje při zkratu.

7 Závěr

Hlavním úkolem této práce bylo vytvoření matematického modelu dvojité napájeného asynchronního stroje vhodného pro analýzu dynamických přechodných stavů. K tomuto účelu byl zvolen program Matlab se svou nadstavbou Simulink. K transformaci diferenciálních rovnic motoru, do blokově orientovaného prostředí Simulinku, bylo použito metody snižování řádu derivace, známou též z teorie regulace. Metoda se zdá být nenáročná na matematické znalosti a tak masově použitelná bez dalších nároků na teorii. Je to však jediná metoda se kterou jsem se v tomto oboru setkal, proto nemohu porovnávat.

Použitá literatura

- [1] Bartoš, V.: Model asynchronního motoru s dvojitým napájením pro řízení výkonu přečerpávací elektrárny. Svratka 1999.
- [2] Bartoš, V.: Elektrické stroje. ZČU, Plzeň 2004.
- [3] Bartoš, V., Bendl, J., Žížek F.: Dvojitě napájený asynchronní stroj pro přečerpávací vodní elektrárny, Sborník ELEN 200, ČVUT Praha.
- [4] Bendl, J.: Přednášky z “Modelování elektrických strojů“ na ZČU Plzeň 2007.
- [5] Měřička, J., Zoubek, Z.: Obecná teorie elektrického stroje. SNTL Praha 1973.
- [6] Měřička, J., Zoubek, Z.: Vybrané partie z elektrických strojů. ČVUT Praha 1984.
- [7] Bednář, M.: Matematický model asynchronního stroje s dvojitým napájením. Diplomová práce, ZČU, Plzeň 2000.
- [8] Štěpina, J.: Prostorové fázory jako základ teorie elektrických strojů, ZČU Plzeň 1993.
- [9] Štěpina, J.: Souměrné složky v teorii točivých elektrických strojů, Academia 1969.
- [10] Žížek, F.: Způsoby měření momentu synchronního stroje. VÚET, Plzeň 1982.
- [11] Javůrek, J.: Regulace moderních elektrických pohonů. Grada Publishing 2003.
- [12] Internet: www.mathworks.com