

# Prediktivní regulátor v proudové smyčce asynchronního motoru

Model predictive controller in current loop control of  
induction motor

*Dušan Zámečník, Ivo Veselý*

*xzamec11@feec.vutbr.cz, xvesel43@feec.vutbr.cz*

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně.

**Abstrakt:** Článek se zabývá použitím lineárního explicitního prediktivního regulátoru typu Model Predictive Control při řízení proudové smyčky asynchronního motoru pomocí vektorového řízení. Výsledky simulací byly získány v prostředí Matlabu / Simulink za použití Multiparametric Toolbox.

**Abstract:** The article deals with using a linear predictive controller, exactly explicit Model Predictive Controller (MPC) to control the current loop of induction motor using vector control. Simulation results were obtained in Matlab / Simulink using Multiparametric Toolbox.

# Prediktívny regulátor v prúdovej slučke asynchrónneho motora

Dušan Zámečník, Ivo Veselý

Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií VUT v Brně  
Email: {xzamec11,xvesel43}@feec.vutbr.cz

**Abstrakt** – Článok sa zaoberá použitím lineárneho explicitného prediktívneho regulátora typu Model Predictive Control pri riadení prúdovej slučky asynchrónneho motora s použitím vektorového riadenia. Výsledky simulácií boli získané v prostredí Matlab/Simulink za použitia Multiparametric Toolboxu.

## 1 Úvod

Prediktívne riadenie (Model predictive control - MPC) je relatívne stará metodológia návrhu regulácie, ktorá umožňuje optimálne riadiť mnohorozmerné dynamické systémy (fázovo neminimálne, s dopravným oneskorením) s obmedzeniami. Je zaujímavé poznamenať, že bola znovu objavená a používaná v praxi bez existencie serióznych teoretických základov. Jej seriózny teoretický rozvoj trvá už takmer 40 rokov (Propoi, 1963, Richalet, 1978). V súčasnosti je to štandardný, moderný a pokročilý spôsob riadenia používaný v priemysle.

Využíva odhad chovania systému na základe jeho modelu na stanovenie vhodného akčného zásahu regulátora a súčasne dokáže priamo v sebe zahrnúť aj obmedzenia systému, akými sú v praxi vždy nejaké fyzické limity riadených zariadení (napr. maximálny prúd, napätie motora, atď.). Prvé uplatnenie našlo v chemickom a petrochemickom priemysle viz [12].

Klasické lineárne regulátory (PID) nemôžu naplno využiť možnosti regulácie už preto, lebo nedokážu počítať s limitnými obmedzeniami v návrhu akčného zásahu. Väčšinou je výstup iba obmedzený saturáciou aby sa zabezpečili obmedzujúce podmienky.

Oproti klasickému riadeniu však MPC riadenie ponúka zohľadnenie obmedzení priamo v algoritme výpočtu akčného zásahu a tým posúva limity úrovne regulácie na vyššiu kvalitatívnu úroveň.

Prediktívne riadenie dokáže poskytnúť komplexnejšiu kvalitu regulácie v zmysle, že sa nemusí jednať len o rýchlosť prechodného deja a dodržanie obmedzení ale aj napr. o zmenšenie príkonu pri takmer nezmenšenom výkone motorov atď.

MPC elektrických motorov sa na poli výskumnej oblasti začalo uplatňovať v praktických aplikáciách často spolu s vektorovým riadením (FOC-Field Oriented Control), ktoré slúži ako jeho platforma, na ktorej sa môže ďalej rozvíjať komplexná regulačná štruktúra. Jeho praktické použitie je však v praxi veľmi zriedkavé a to najmä kvôli obecným vysokým výpočtovým nárokom [4,5].

Avšak neustále prebieha búrlivý vývoj v tejto oblasti, dochádza k zlepšovaniu stávajúcich algoritmov napr. [10] a rozvoji tohto typu riadenia ako aj k zväčšovaniu výpočtového výkonu riadiacich procesorov. Preto je dobré sledovať aj tento

trend a obecné venovať MPC, ako modernej metóde riadenia, patričnú pozornosť.

## 2 Vektorové riadenie

Vektorové riadenie je dlhodobým štandardom v oblasti riadenia elektrických pohonov. Umožňuje použiť na riadenie napr. asynchrónneho motora podobný princíp ako keby sme riadili vektorový motorček s cudzím budením.

Vektorové riadenie sa skladá z kaskádnej štruktúry pozostávajúcej z vnútornej, veľmi rýchlej prúdovej slučky a z vonkajšej slučky regulujúcej magnetický tok a otáčky motora. Dokáže teda regulovať zvlášť zložky statorového prúdu:

- $d$ -zložku  $i_{sd}$ , ktorá určuje magnetický tok a zodpovedá v energetike za jalovú zložku výkonu,
- $q$ -zložku  $i_{sq}$ , ktorá určuje krútiaci moment a predstavuje v energetike činný výkon.

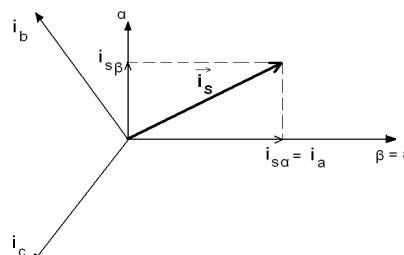
Jadrom vektorového riadenia sú dve transformácie: Clarkova a Parkova.

### 2.1 Clarkova transformácia (3/2)

Clarkova transformácia alebo transformácia 3/2 využíva fakt, že aj keď máme tri prúdové zložky predstavujúce tri fázy, ktorými napájame motor, tak tieto zložky vytvárajú jeden točivý vektor magnetického poľa. A pretože každý vektor v rovine možno zapísať pomocou dvoch súradníc tak aj tento vektor sa vyjadří v dvoch súradniciach  $\alpha$  a  $\beta$ .

Máme tri zložky prúdu  $i_a, i_b, i_c$  a tie transformujeme do 2D vektoru  $\vec{i}_s$  vyjadreného v zložkovom tvare, ktorého rovnice sú:

$$\begin{aligned} i_{s\alpha} &= i_a \\ i_{s\beta} &= \frac{1}{\sqrt{3}}i_a + \frac{2}{\sqrt{3}}i_\beta \end{aligned} \quad (1)$$

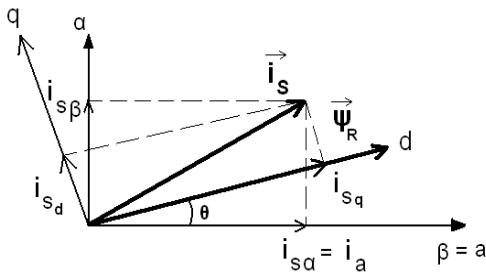


Obrázok 1: Clarkova transformácia

## 2.2 Parkova transformácia (alfa, beta -> d,q)

Parkova transformácia mení statorový referenčný rámec *alfa-beta* na rotujúci rámec zarovnaný s polohou rotora tak, že *d*-zložka je zarovnaná s rotorovým tokom viz obr.2. Znalosť pozície rotora (uhol natočenia) je pre správny regulačný zásah nevyhnutná a získava sa integráciou uhlovej rýchlosti rotora. Celá transformácia je v podstate iba 2D rotáč:

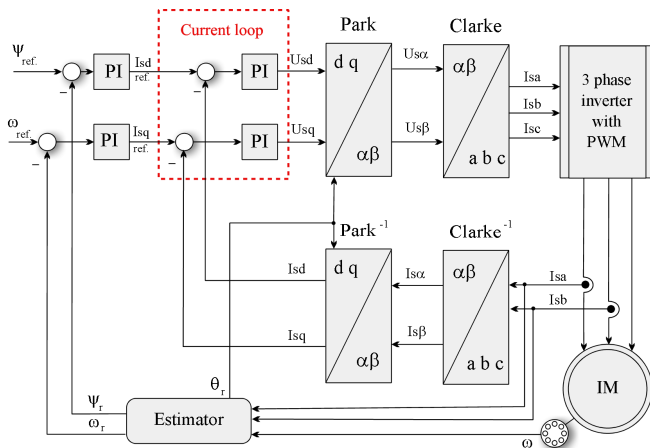
$$\begin{aligned} i_{sd} &= i_{s\alpha} \cos(\theta) + i_{s\beta} \sin(\theta) \\ i_{sq} &= -i_{s\alpha} \sin(\theta) + i_{s\beta} \cos(\theta) \end{aligned} \quad (2)$$



Obrázok 2: Parkova transformácia

## 2.3 Celková štruktúra vektorového riadenia

Celá štruktúra sa skladá z oboch vyššie spomenutých transformácií v priamom aj inverznom tvare a možno ju vidieť na obr.3. Červenou farbou je vyznačená prúdová slučka, do ktorej sa neskôr zapojí MPC regulátor.



Obrázok 3: Celková štruktúra vektorového riadenia

## 3 Prediktívne riadenie

Prediktívny regulátor typu MPC využíva znalosť odhadu budúcich stavov a výstupov na stanovenie vhodného akčného zásahu a súčasne dokáže v sebe zohľadniť obmedzujúce podmienky. Vyčerpávajúce riešenia praktických otázok prediktívneho riadenia, ktoré treba riešiť pri implementácii sa dajú nájsť v [1].

Model predikuje budúce chovanie (odozvu systému) a táto odozva má dve zložky:

- voľnú odozvu – vyjadruje odozvu systému v závislosti od počiatkových podmienok bez pôsobenia akčného zásahu,
- nútenú odozvu – vyjadruje zmenu chovania systému s ohľadom na pôsobenie akčného zásahu.

Súčet týchto odoziev tvorí úplná odozva. Dĺžka úplnej odozvy alebo aj horizont predikcie  $N_p$ , teda určuje o koľko krokov dopredu optimalizátor „vidí“ vývoj systému.

### 3.1 Stratégia ustupujúceho horizontu

MPC používa v princípe dopredný spôsob riadenia, ktorý sám o sebe neponúka spätnú väzbu, ktorá je v regulácii taká dôležitá. Na zavedenie spätnej väzby sa používa stratégia ustupujúceho/kĺzajúceho horizontu (RHC-Receding Horizon Control) a je to základná charakteristika MPC od jeho zrodu.

Tá hovorí, že v každom kroku sa zmeria (alebo rekonštruuje) stav systému a vypočíta sa akčný zásah na niekoľko krokov dopredu, ale prakticky sa do sústavy aplikuje len hodnota prvého kroku a zvyšok sa zahodí. V ďalšom kroku sa znova zmeria aktuálny stav systému a celý proces sa opakuje.

### 3.2 Riadiaci horizont

Je jedno z možných zjednodušení výpočtu. Obecne je úloha MPC veľmi výpočtovo náročná preto sa občas zavádza horizont riadenia  $N_C$ , tak že  $N_C < N_p$ . Bez tohto výpočtového obmedzenia platí  $N_C = N_p$ .

Skrátením počtu krokov, znížime stupeň voľnosti a výrazne si zjednodušíme celkový výpočet. Optimalizácia vypočíta len prvých  $N_C$  krokov akčného zásahu a zvyšok akčného zásahu sa až do konca predikčného horizontu nebude meniť a zostane na hodnote posledného vypočítaného akčného zásahu.

### 3.3 Model systému

Pre aplikáciu MPC sa ako najvýhodnejší model ponúka práve stavový popis v diskretnej forme:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t+1) &= \mathbf{A} \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C} \mathbf{x}(t) + \mathbf{D} \mathbf{u}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

ktorý obsahuje obmedzenia:

$$y_{\min} \leq y(t) \leq y_{\max}, \quad u_{\min} \leq u(t) \leq u_{\max}. \quad (4)$$

Úplná odozva systému (budúci vývoj stavov) vyzera:

$$\mathbf{x}(t+j) = \mathbf{A}^j \mathbf{x}(t) + \sum_{k=0}^{j-1} \mathbf{A}^j \mathbf{B} \mathbf{u}(t+j-1-k), \quad (5)$$

kde prvý člen zodpovedá hore uvedenej voľnej odozve a druhý nútenej odozve.

Predikcia modelu v maticovej forme viz (9) :

$$\vec{y} = [y(t)^T \ y(t+1)^T \ y(t+2)^T \ \dots \ y(t+N_p-1)^T]^T. \quad (6)$$

$$\bar{u} = [u(t)^T \ u(t+1)^T \ u(t+2)^T \ \dots \ u(t+N_p-1)^T]^T, \quad (7)$$

$$\bar{P} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{N_p-1} \end{bmatrix}, \quad \bar{H} = \begin{bmatrix} D & 0 & 0 & 0 \\ CB & D & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ CA^{N_p-2}B & \dots & CB & D \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\bar{y} = \bar{P}x(t) + \bar{H}\bar{u}. \quad (9)$$

### 3.4 Účelová funkcia

Súčasťou optimalizátora je účelová/penalizačná funkcia. Má vždy aditívny tvar, čo znamená, že jej hodnota rastie ak rastie odchýlka. Veľmi dobré výsledky poskytuje práve kvadratická funkcia a prakticky sa používa veľmi často, preto bude v tomto článku použitá. Kvadratická účelová funkcia s lineárnym obmedzením povedie na riešenie kvadratického programovania (QP). Jej obecná definícia pre riadenia do počiatku sústavy súradníc vyzerá:

$$J(N_p) = \mathbf{x}(t+N_p)^T \mathbf{P}_N \mathbf{x}(t+N_p) + \sum_{j=1}^{N_p} \left\{ \mathbf{x}(t+j-1)^T \mathbf{Q} \mathbf{x}(t+j-1) + \mathbf{u}(t+j-1)^T \mathbf{R} \mathbf{u}(t+j-1) \right\}, \quad (10)$$

kde  $\mathbf{P}_N$  je váhová matica konečného stavu,  $\mathbf{Q}$  je váhová matica pre stavy v každom kroku okrem posledného a  $\mathbf{R}$  pre penalizáciu akčného zásahu. Maticu  $\mathbf{P}_N$  sa volí o niečo väčšia než  $\mathbf{Q}$  aby sa dosiahla lepšia stabilita regulátora. Maticu  $\mathbf{R}$  dokonca možno zvoliť tak, aby penalizovala len prírastok akčného zásahu a nie len jeho absolútnu hodnotu.

Z hľadiska formulácie MPC sú zaujímavé práve symetrické a pozitívne definitné váhové matice.

### 3.5 Transformácia do QP

Kvadratické programovanie je časť nelineárneho programovania, kde hľadáme extrém kvadratickej funkcie (z toho vyplýva jediné lokálne minimum je súčasne aj globálnym) s ohľadom na lineárne obmedzenia stavov. Účelovú funkciu s obmedzeniami možno, za účelom zápisu úlohy kvadratického programovania, prepísať do nasledujúcej formy:

$$V(x(t)) = \frac{1}{2} x^T(t) Y x^T(t) + \min \left\{ \frac{1}{2} \bar{u}^T H \bar{u} + x^T F \bar{u} \right\} \quad (11)$$

s ohľadom na:

$$G \bar{u} \leq W + E x(t), \quad (12)$$

kde všetky nové matice možno jednoducho odvodiť z matíc  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{Q}$  a  $\mathbf{R}$ .

Zavedením substitúcie podľa [7]:

$$z = \bar{u} + H^{-1} F^T x(t), \quad (13)$$

možno transformovať problém do formy pre mpQP:

$$V_z(x) = \min \frac{1}{2} z^T H z \quad (14)$$

s ohľadom na obmedzenia:

$$G z \leq W + S x(t), \quad (15)$$

kde

$$S = E + G H^{-1} F^T, \quad (16)$$

$$V_z = V(x) - \frac{1}{2} x^T (Y - F H^{-1} F^T) x. \quad (17)$$

### 3.6 Optimalizácia explicitným vs implicitným regulátorom

Na výpočet úlohy kvadratického programovania (QP) sa používa program na hľadanie viazaného extrému funkcie. Výsledkom optimalizácie je sekvencia akčných zásahov  $\bar{u}$ , z ktorej, podľa stratégie ustupujúceho horizontu, použijeme len prvý  $u(t)$ .

Implicitný regulátor pracuje tak, že sám realizuje v každom kroku výpočet minima účelovej funkcie s obmedzeniami, do ktorej vstupuje aktuálny stav systému. Takže neustále „on-line“ počíta úlohu kvadratického programovania. Priame (implicitné) riešenie QP pomocou obecných programov, môže byť príliš pomalé. Moderné QP riešiteľé sú založené napr. na aktívnych množinách alebo priesečníkových bodoch viac v [17].

Program QP založený na aktívnych množinách je iteratívny algoritmus. Pracuje tak, že v každej iterácii testuje podmienky optimality pre aktuálnu pracovnú množinu ohraničenú aktívnymi obmedzeniami. Ak aktuálna pracovná množina nevedie k optimálnemu riešeniu, tak modifikuje pracovnú množinu pridaním alebo odobraním aktívnych obmedzení.

Táto metóda je vhodná, rýchla a veľmi prakticky efektívna pre relatívne malé počty obmedzení.

Implicitný regulátor je teda náročnejší na výpočtový výkon pri regulácii. Obecne platí, že kde sa dá tak treba použiť práve tento typ regulátora.

Explicitný regulátor oproti tomu si spočíta všetky riešenia dopredu t.j. pre všetky kombinácie stavov, obmedzení, referenčných signálov, atd. Tieto dosiahnuteľné kombinácie vytvoria oblasti, nazveme ich regióny. Teda väčšina zdĺhavých výpočtov tu prebieha „offline“. V on-line časti už iba vyberá riešenia prehľadávaním regiónov. Nejedná sa už o klasické QP ale o mpQP (multiparameter Quadratic Program), kde stavy dynamického systému, referencie, atd. sú parametre a akčný zásah (výstup regulátora) je optimalizačná premenná. Riešením mpQP je po častiach lineárna funkcia stavov (PWA- piecewise affine) - podobne ako u stavového regulátora, viz [14-16].

Je možné dokázať, že pre každú dosiahnuteľnú  $i$ -tú kombináciu obmedzení, je akčný zásah daný lineárnou kombináciou stavov:

$$u(t) = \mathbf{K}_i \mathbf{x}(t) + g_i. \quad (18)$$

Teda tento typ regulátora je náročnejší na pamäť, ale rýchlejší z hľadiska výpočtového času. Na prehľadovanie regiónov a výber akčného zásahu sa dá použiť binárny rozhodovací strom viz [10].

Práve explicitný regulátor možno použiť pre extémne krátke periódy vzorkovania aké sa vyskytujú pri riadení motorov a tento typ bude použitý aj v nasledovných simuláciách.

### 3.7 Stabilita

Stabilitu nemožno jednoducho analyzovať ako u klasických lineárnych systémov. Vlastnosti uzavretej riadiacej slučky sú kvôli prítomnosti obmedzení stávajú nelineárne a ovplyvňujú ich všetky ladiace parametre ako účelová funkcia (všetky jej matice), horizont predikcie, horizont riadenia, atď.

U MPC môžeme analyzovať stav bez aktívnych obmedzení alebo pre vybrané dosiahnuteľné množiny stavov. Na tento problém sa treba pozerať ako na nelineárny problém, ktorý ešte v súčasnej dobe nie je úplne uzavretý. Ale aj napriek tomu ponúka MPC v praktických aplikáciách veľmi dobré výsledky v oblasti stability aj robustnosti, podrobná analýza stability sa nachádza napr. v [19].

### 3.8 Nulová ustálená odchýlka

Doposiaľ prezentovaná koncepcia MPC aj s použitím stratégie ustupujúceho horizontu nedokáže zabezpečiť nulovú ustálenú odchýlku pokiaľ sa v systéme vyskytne porucha alebo bude nepresnosť v modeli. Tento problém sa dá vyriešiť napr. aj zavedením nového stavu poruchy do modelu viz [1]. V článku je použitý ďalší spôsob, a to taký, že použijeme prírastkový model.

Uskutočníme to tak, že do výpočtového modelu v MPC pridáme astatizmus, aby si regulátor „myslel“, že reguluje sústavu s astatizmom a to spôsobí, že výstupom optimalizácie nebude akčný zásah v jeho absolútnej podobe ale len jeho zmena, prírastok  $\Delta u$ , ktorý sa zase zintegrujú na  $u$ .

## 4 Návrh regulátora a modelu

Model systému tvorí kľúčovú časť návrhu prediktívneho regulátora. Základné rovnice modelu asynchrónneho motora, ktorý má referenčný rámec zarovnaný s uhlovou rýchlosťou  $\omega_k$ :

$$\mathbf{u}_S = R_S \mathbf{i}_S + \frac{d\boldsymbol{\psi}_S}{dt} + j\omega_k \boldsymbol{\psi}_S, \quad (19)$$

$$0 = R_R \mathbf{i}_R + \frac{d\boldsymbol{\psi}_R}{dt} + j(\omega_k - \omega) \boldsymbol{\psi}_R, \quad (20)$$

$$\boldsymbol{\psi}_S = L_S \mathbf{i}_S + L_M \mathbf{i}_R, \quad (21)$$

$$\boldsymbol{\psi}_R = L_R \mathbf{i}_R + L_M \mathbf{i}_S. \quad (22)$$

Konkrétne parametre simulovaného motora sú v tab.1.

Tabuľka 1: Parametre motora

$R_S$	odpor statora	0,894 $\Omega$
$R_R$	odpor rotora	0,85 $\Omega$
$L_S$	indukčnosť statora	0,1192 H
$L_R$	indukčnosť rotora	0,1182 H
$L_M$	vzájomná indukčnosť	0,112 H

Pre riadenie v prúdovej slučke je vhodné si vybrať ako stavové premenné  $i_s$  a  $\boldsymbol{\psi}_r$ . Vektorové riadenie s referenčným rámcom  $\boldsymbol{\psi}_r$  zarovnaným s rotorovým tokom a rýchlosťou  $\omega_s$ , umožňuje zanedbať, odstrániť zložku  $\boldsymbol{\psi}_{rd}$ . Aj o tejto úprave je model stále nelineárny a tak sa bude ďalej zjednodušovať, aby sa mohlo použiť lineárne MPC.

Zanedbáme krížové väzby medzi zložkami  $d$  a  $q$  a po úpravách dostaneme nasledujúce rovnice odvodené podľa [4], prakticky tak dostávame dva zotrvačné články prvého rádu:

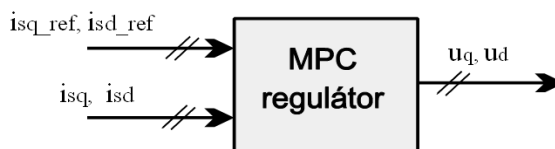
$$i_{sd} + \frac{1}{a} \frac{di_{sd}}{dt} = \frac{1}{b} u_{sd}, \quad (23)$$

$$i_{sq} + \frac{1}{a} \frac{di_{sq}}{dt} = \frac{1}{b} u_{sq}, \quad (24)$$

kde koeficienty  $a, b$  sú:

$$b = \frac{L_S L_R - L_M^2}{L_R}, \quad a = \frac{L_S L_R^2 - L_R L_M^2}{L_R^2 R_S + L_H^2 R_R}. \quad (25)$$

Štruktúra prediktívneho regulátora je na obr. 4. Kde referenčné vstupy  $i_{sd\_ref}$  a  $i_{sq\_ref}$  výstupy regulátorov magnetického toku a mechanickej rýchlosti otáčania. Význam jednotlivých vstupov a výstupov možno pochopiť z obr. 3.



Obrázok 4: Štruktúra MPC regulátora

Diskrétny model môžeme, kvôli malej vzorkovacej perióde  $T_{VZ}=120 \mu s$ , veľmi presne aproximovať podľa vzorca:

$$\frac{dx}{dt} \approx \frac{x(t+1) - x(t)}{T_{VZ}} \quad (26)$$

A dostaneme diskkrétne matice stavového modelu:

$$A_d = I - T_{VZ} \cdot A \quad (27)$$

$$B_d = I - T_{VZ} \cdot B$$

Stavové premenné budú:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \quad (28)$$

a výsledný diskrétny model:

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{a} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{a} \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + \begin{bmatrix} \frac{1}{b} & 0 \\ 0 & \frac{1}{b} \end{bmatrix} \mathbf{u}(t) \quad (29)$$

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \begin{bmatrix} -0,984 & 0 \\ 0 & -0,984 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + \begin{bmatrix} 0,0096 & 0 \\ 0 & 0,0096 \end{bmatrix} \mathbf{u}(t) \quad (30)$$

$$\mathbf{y}(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) \quad (31)$$

Je jasne vidieť, že výstup systému je súčasne stav (pre oba zotrvačné články 1.rádu).

Celý návrh a simulácia mpQP je realizovaná pomocou voľne dostupného toolboxu pre Matlab – Multi-Parametric Toolbox-u (MPT) (Kvasnica & kol., 2009) viz [18].

#### 4.1 Nastavenie regulátora

Zvolili sme explicitný regulátor, prírastkový model schopný sledovať referenciu a uregulovať na nulovú ustálenú odchýlku, s horizontom predikcie  $N_p=7$ , horizontom riadenia  $N_c=4$  a pevnými obmedzeniami:  $-200 < u < 200$  V,  $-25 < i < 25$  A. Matica  $\mathbf{Q}$  určuje penalizáciu stavov (okrem koncového) a matica  $\mathbf{P}_N$  penalizáciu koncového stavu,  $\mathbf{R}$  je penalizácia akčného zásahu.

Akčný zásah je v tomto prípade napätie poslané do sústavy a pretože nám takmer nezáleží na tom, či to bude 0V alebo 200V (stačí, že budú dodržané pevné limity) nemá penalizácia akčného zásahu prezentovaná maticou  $\mathbf{R}$  takmer žiadny význam, kvôli realizovateľnosti ale musí byť pozitívne definitná (nemôže byť nulová).

Naopak penalizácia stavov (resp. v tomto súčasne prípade výstupov) je pre nás veľmi žiaduca, lebo penalizuje rozdiel skutočného výstupu sústavy od referenčnej hodnoty. Čím viac chceme minimalizovať odchýlku od referencie tým musí byť hodnota matíc  $\mathbf{Q}$  a  $\mathbf{P}_N$  väčšia.

Preto je snahou nastaviť pomer  $\mathbf{Q} \gg \mathbf{R}$ , aby sme zbytočne nepenalizovali akčný zásah ale priamo výstup sústavy a kvôli zlepšeniu stability  $\mathbf{Q} < \mathbf{P}_N$ :

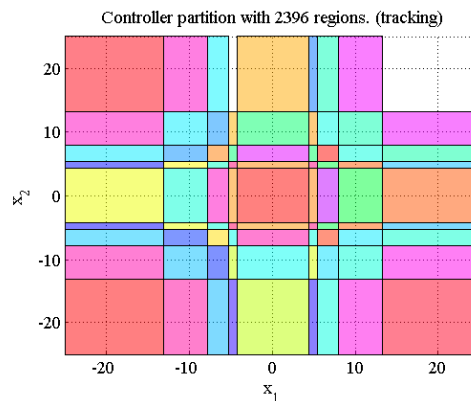
$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 9000 & 0 \\ 0 & 9000 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{P}_N = \begin{bmatrix} 15000 & 0 \\ 0 & 15000 \end{bmatrix}, \quad (32)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (33)$$

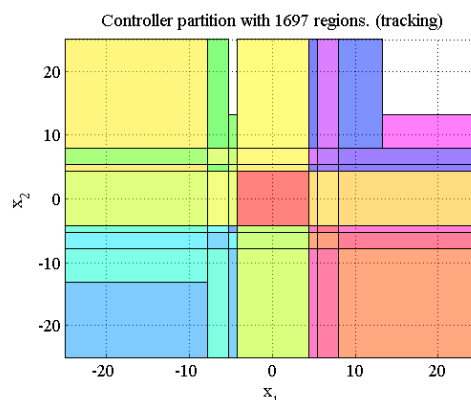
## 5 Výsledky simulácií

Na obrázkoch 5 a 6 vidíme grafické vyjadrenie regiónov explicitného MPC regulátora bez zjednodušenia a so zjednodušením (spájanie susedných regiónov s rovnakým zákonom riadenia). Nutné dodať, že obrázok ilustruje len zjednodušenie, priemet mnohorozmerného regulátora do 2D roviny  $x_1x_2$  ( $i_{sq}, i_{sd}$ ).

Nastavenia parametrov simulácie: žiadaná uhlová rýchlosť  $\omega_a$  a točivý moment  $T$  v čase sú v tab.2.



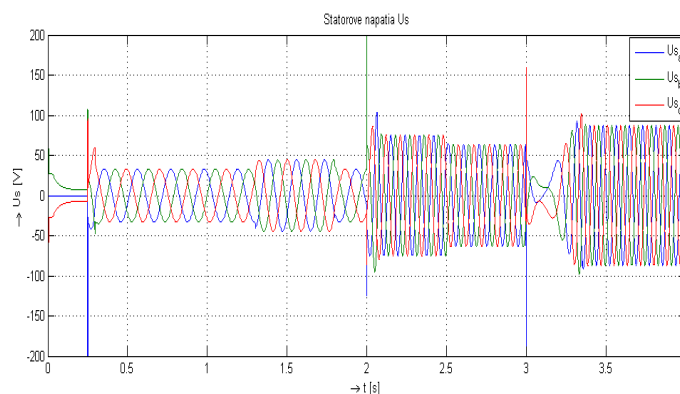
Obrázok 5: Zobrazenie explicitného MPC regulátora bez zjednodušenia



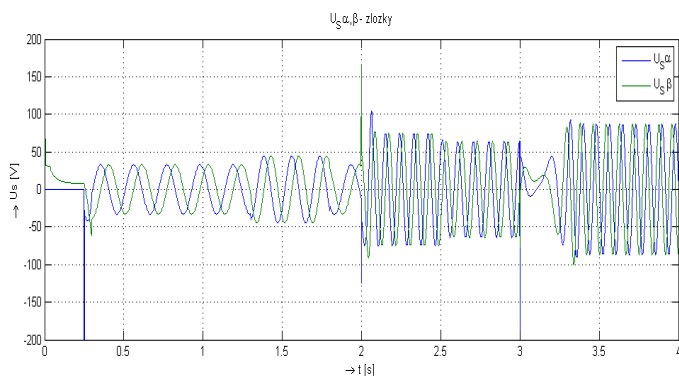
Obrázok 6: Zobrazenie explicitného MPC regulátora so zjednodušením

Tabuľka 2: Parametre priebehu simulácie

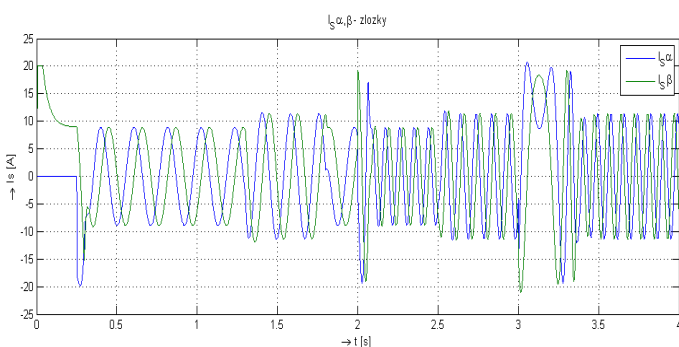
t[s]	0	0,2	1,3	1,8	2	2,5	3
$\omega$ [s <sup>-1</sup> ]	0	30	30	30	70	70	-70
T[Nm]	0	0	30	0	0	-30	-30



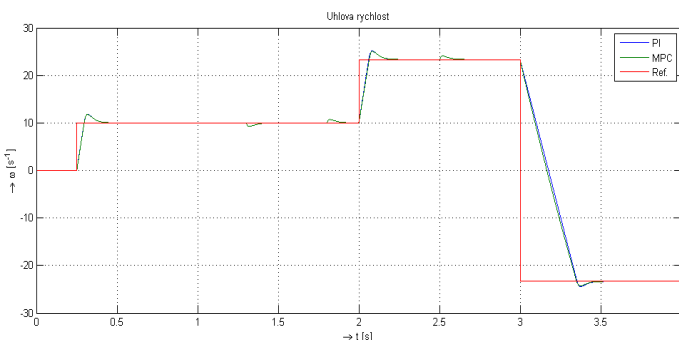
Obrázok 7: Priebehy satorových napätí  $U_{Sabc}$



Obrázok 8: Zložky statorového napätia v alfa beta



Obrázok 9: Zložky statorového prúdu v alfa beta súradniciach



Obrázok 10: Porovnanie otáčok PI a MPC regulátora

Grafické priebehy statorových veličín sú zobrazené na obrázkoch obr.7, 8 a 9.

Nakoniec ešte porovnanie priebehov uhlovej rýchlosti v závislosti od použitej regulácie. Na obr. 10 je vidieť porovnanie regulácie uhlových otáčok MPC a PI regulátora. Je vidieť veľmi podobný priebeh v odozve na riadenie aj na poruchu. Použitý PI regulátor so saturáciou mal nastavenie: zosilnenie  $P = 54$ , zosilnenie integrátora  $I = 0,4$  a saturácia na výstupe, ktorá obmedzuje akčný zásah na max  $\pm 200V$ .

Takýto PI regulátor so saturáciou sa chová pri prudkých zmenách riadenia podobne ako dvojstavový regulátor typu bang-bang control, ktorý dosahuje najrýchlejšiu zmenu rýchlostí ale najagresívnejším spôsobom.

## 6 Záver

V článku sme priblížili použitie MPC regulátora ako regulátora v prúdevej slučke asynchrónneho motora. Pretože sa jednalo o sústavu s extrémne krátkou periódou vzorkovania ( $T=120\mu s$ ) dali sme prednosť explicitnému tvaru regulátora.

Použitie v simulácii bolo úspešné ale vo výsledku na nami definovanom type motora a použitého modelu neprekonal (ale ani nezaostalo) výpočtovo oveľa jednoduchší PI regulátor so saturáciou na výstupe.

MPC je vhodné nasadzovať najmä do procesov, kde bežne rozšírená regulácia (PID) má najväčšie rezervy. Mohlo by sa jednať o procesy, kde treba použiť sofistikovanejšie modely motora pre oveľa výkonnejšie motory (rádovo desiatky až tisíce kW) s pomalšími prechodovými dejmi, ktoré vyžadujú omnoho prepracovanejšiu a komplikovanejšiu reguláciu na maximálne využitie výkonu a zabezpečenie množstva uvažovaných fyzikálnych obmedzení.

Vzhľadom k tomu, že bolo použité iba lineárne MPC s extrémne zjednodušeným a nie príliš presným modelom sústavy, tak s použitím sofistikovanejších a prepracovanejších modelov a radiaciach štruktúr existuje veľký priestor kam sa dá pokročiť v oblasti prediktívneho riadenia.

## Podakovanie

Táto publikácia vznikla za podpory grantu "Moderní metody a prostředky v automatizaci" financované z Internej grantovej agentúry Vysokého učenia technického v Brně (číslo grantu FEKT-S-10-12).

## Literatúra

- [1] BOLOGNANI, S.; PERETTI, L.; ZIGLIOTTO, M. 2009. Design and Implementation of Model Predictive Control for Electrical Motor Drives. *IEEE Transactions on industrial electronics*, zväzok 56, č.6, str. 1925-1936, 2009.
- [2] GEYER, T.; PAPAFOIOTOU, G.; MORARI, M. 2009. Model Predictive Direct Torque Control – Part I: Concept, Algorithm, and Analysis. In: *IEEE Transactions on industrial electronics*, zv.56, č.6, 2009.
- [3] GEYER, T.; KLEY, J.; PAPADOPOULOS, K.; BOHREN, P.; MORARI, M. 2009. Model Predictive Direct Torque Control – Part II: Implementation and Experimental Evaluation. In: *IEEE Transactions on industrial electronics*, zv. 56, č.6, 2009.
- [4] KENNEL, R.; LINDER, A.; 2001. Generalized Predictive Control (GPC)-Ready for use in drive applications?. In: *Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf.*, 2001, str. 1839-1844.
- [5] KENNEL, R.; LINDER, A.; 2005. Model Predictive Control for Electrical Drives. *IEEE 36th Power Electronic Specialists Conference*, Recife, Brazil, 2005, ISBN:0-7803-9033-4.
- [6] KVASNICA, M.; GRIEDER, P.; BAOTIC, M. et all. "Multi Parametric Toolbox (MPT) v 2.6" [online]. ETH Zurich, 2009. [cit. 26.3.2010]. available in: <<http://control.ee.ethz.ch/~mpt/>>.

- [7] KUTASI, N.; KELEMEN, A.; IMECS, M.; , "Vector Control of Induction Motor Drives with Model Based Predictive Current Controller," *Computational Cybernetics, ICCS 2008. IEEE International Conference on* , str.21-26, 2008, ISBN:978-1-4244-2874-8.
- [8] MIRANDA, H.; CORTÉS, P.; YUZ, J.; RODRÍGUEZ, J. 2009. Predictive Torque Control of Induction Machines Based on State-Space Models. In.: *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, zv.56, č.6, 2009.
- [9] TEXAS INSTRUMENTS; 1998. *Field Orientated Control of 3-Phase AC-Motors* [on line]. TI Europe, 1998. [cit. 18.3.2010] Available on <focus.ti.com/lit/an/bpra073/bpra073.pdf>.
- [10] TONDEL, P.; JOHANSEN T.A.; BEMPORAD A. „Evaluation of piecewise affine control via binary search tree“, *Automatica* 2003, zv. 39, č. 5, str. 945-950.
- [11] KVASNICA, M. *Real-Time Model Predictive Control via Multi-Parametric Programming: : Theory and Tools*. Saarbrücken : VDM Verlag, 2009. 272 s. ISBN 978-3639206449.
- [12] Qin, S.J.; Badgwell, T.A. An overview of industrial model predictive control applications. In J.C.Kantor, C.E.Garcia, and B.Carnahan, editors, *Fifth International Conference on Chemical Process Control – CPC V*, str. 232-256. American Institute of Chemical Engineers, 1996
- [13] Bemporad, A.; Morari, M.; Dua V. and Pistikopoulos E.N. The explicit linear quadratic regulator for constrained systems. *Automatica* 38 1 (2002), str. 3–20.
- [14] Bemporad, A., Borrelli, F., & Morari, M. Model predictive control based on linear programming—the explicit solution. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003.
- [15] Tøndel, P., Johansen, T. A., & Bemporad, A. (2001a). An algorithm for multi-parametric quadratic programming and explicit MPC solutions. In *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control*. Orlando, FL, str. 1199–1204.
- [16] Bemporad, A.; Morari, M.; Dua, V.; Pistikopoulos, E.N.; , "The explicit solution of model predictive control via multiparametric quadratic programming," *American Control Conference, Zborník 2000* , zv.2, str.872-876, 2000.
- [17] Rao, C. V. and Wright, S. J. and Rawlings, J. B. Application of Interior-Point Methods to Model Predictive Control, In *Journal of Optimization Theory and Applications*, Springer Netherlands, str. 723-757, 1998.
- [18] Kvasnica M.; Grieder P.;Baoti M. *Multi-Parametric Toolbox (MPT)*, 2004 [cit. 22.1.2011], Dostupné z URL: <http://control.ee.ethz.ch/~mpt/> .
- [19] Mayne D.Q.; Rawling J.B.; Rao C.V. Constrained model predictive control: Stability and optimality, *Automatica* zv. 36, str. 789-814, 2000.
- [20] Propoi, A.I. Use of linear programming methods for synthesizing sampled data automatic systems, *Automat. Remote Control*, zv. 24, č. 7, str. 837-844, 1963.
- [21] Richalet, J.; Rault, A.; Testud, J.L.; Papon, J. Model predictive heuristic control: application to industrial processes, *Automatica*, zv. 14, str. 413-428, 1978.