

# Prediktivní řízení s měřenou poruchovou veličinou.

Predictive control with disturbance rejection.

Bc. Ondřej Machalský

---

Diplomová práce  
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

\*\*\* nescannované zadání str. 1 \*\*\*

\*\*\* nescannované zadání str. 2 \*\*\*

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá problematikou prediktivního řízení s měřenou poruchovou veličinou. V teoretické části byl odvozen prediktor zahrnující ve výpočtech známou poruchovou veličinu. Na jeho základě byl navrhnout a v programovém prostředí MATLAB realizován regulátor. Funkce regulátoru byla ověřena na laboratorním modelu AMIRA DR300. Byl zkoumán vliv jednotlivých parametrů prediktivního regulátoru na regulační pochod. Také byl navrhnout regulátor tvořený kombinací prediktivního regulátoru a PID regulátoru.

**Klíčová slova:** Prediktivní řízení, PID regulátor, měřená poruchová veličina, model AMIRA DR300

## **ABSTRACT**

The diploma work is focused on problematic of the predictive control with disturbance rejection. Predictor, which contains known disturbance quantity, was derived in theoretical part. Controller was designed and made in MATLAB development environment. Functions of the controller was verified on lab model AMIRA DR300. Influence of the single parameters of the predictive controller on regulating process was researched. Also controller with the combination of the predictive regulator and PID regulator was designed.

**Keywords:** Predictive control, PID controller, Disturbance rejection, Model AMIRA DR300

Děkuji vedoucímu své diplomové práce prof. Ing. Vladimírovi Bobálovi, CSc. za odborné vedení mé diplomové práce, podnětné připomínky a rady udílené při vypracování práce. Dále děkuji Ing. Marku Ing. Petru Chalupovi, Ph.D. za pomoc při řešení odborných problémů.

**Prohlašuji, že**

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

**Prohlašuji,**

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....  
podpis diplomanta

**OBSAH**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ÚVOD</b> .....  | <b>8</b>  |
| <b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....                                 | <b>9</b>  |
| <b>1 LITERÁRNÍ REŠERŠE</b> .....                               | <b>10</b> |
| <b>2 PRINCIP PREDIKTIVNÍHO ŘÍZENÍ</b> .....                    | <b>13</b> |
| 2.1 KRITERIÁLNÍ FUNKCE .....                                   | 13        |
| <b>3 NÁVRH PREDIKTORU S MĚŘENOU PORUCHOVOU VELIČINOU</b> ..... | <b>15</b> |
| 3.1 ODVOZENÍ VOLNÉ ODEZVY .....                                | 16        |
| 3.2 ODVOZENÍ NUCENÉ ODEZVY .....                               | 17        |
| 3.2.1 Ilustrační příklad .....                                 | 19        |
| 3.3 OMEZUJÍCÍ PODMÍNKY .....                                   | 20        |
| <b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....                                 | <b>22</b> |
| <b>4 IDENTIFIKACE SOUSTAVY</b> .....                           | <b>23</b> |
| 4.1 VOLBA PRACOVNÍHO BODU .....                                | 24        |
| 4.2 ZÍSKÁNÍ EXPERIMENTÁLNÍCH DAT .....                         | 24        |
| <b>5 NÁVRH REGULÁTORU</b> .....                                | <b>27</b> |
| 5.1 VÝPOČET ROVNICE PRO QUADPROG .....                         | 28        |
| 5.2 ALGORITMUS REGULÁTORU .....                                | 29        |
| 5.3 SROVNÁNÍ PREDIKTIVNÍHO REGULÁTORU A PID REGULÁTORU .....   | 29        |
| <b>6 OMEZENÍ AKČNÍHO ZÁSAHU</b> .....                          | <b>32</b> |
| <b>7 ROBUSTNOST</b> .....                                      | <b>34</b> |
| <b>8 PARAMETRY REGULÁTORU</b> .....                            | <b>36</b> |
| 8.1 VLIV PARAMETRŮ NA POTLAČENÍ PORUCHY .....                  | 42        |
| <b>9 KOMBINACE PREDIKTIVNÍHO A PID REGULÁTORU</b> .....        | <b>45</b> |
| <b>ZÁVĚR</b> .....   | <b>48</b> |
| <b>ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ</b> .....                                | <b>49</b> |
| <b>LITERATURA</b> .....  | <b>50</b> |
| <b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....                | <b>53</b> |
| <b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....                                    | <b>55</b> |
| <b>SEZNAM TABULEK</b> .....                                    | <b>57</b> |
| <b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....                                     | <b>58</b> |

## ÚVOD

První principy regulace byly použity již ve starověkém Egyptě u vodních kol pohánějících mlýny na obilí nebo zavlažovací systémy.

V novodobých dějinách můžeme nalézt například ruský objev regulátoru výšky hladiny v kotlích realizovaný Ivanem Ivanovičem Polzumovem (1765). Ve stejném století, roku 1782, byl Jamesem Watem objeven také známý kulový odstředivý regulátor pro regulaci otáček parního stroje. Zajímavostí je, že oba tyto regulátory se v různých modifikacích používají dodnes. V roce 1911 byl Američanem Elmerem Sperryem instalován První PID regulátor.

Velký rozvoj zaznamenala automatizace s rozvojem elektrotechniky. Mezi důležité milníky patří například objev tranzistoru roku 1947, vynález integrované obvodu r. 1958, což vedlo později k později sestavení operačních zesilovačů. Dalším posunem ve vývoji byly mikropočítače. První 4-bitový mikroprocesor (I 4004) dala na trh firma Intel v roce 1971. To umožnilo rozvoj číslicových metod řízení. S rostoucím výpočetním výkonem a se zvyšujícími se požadavky na kvalitu řízení u stále složitějších průmyslových procesů byl možný rozvoj tzv. „Advanced Process Control“ (APC), neboli pokročilých metod řízení. Mezi tyto metody patří například adaptivní řízení, které má význam, pokud se s časem mění charakteristiky regulované soustavy. V současnosti jsou velmi populární také algoritmy využívající fuzzy logiku nebo neuronové sítě. Mezi pokročilé metody řízení patří také prediktivní řízení, kterým se zabývá tato diplomová práce.



## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 LITERÁRNÍ REŠERŠE

Pro provoz průmyslových zařízení v optimálním režimu za každých podmínek je nevyhnutelné, aby generované akční zásahy byly optimální vzhledem na zadané kritéria, jako např. minimalizace spotřeby vstupních surovin, případně maximalizace výsledných získávaných produktů. Tento způsob řízení se běžně označuje jako optimální řízení. Jedním ze způsobů implementace optimálního řízení v průmyslové praxi je tzv. prediktivní řízení s modelem (Model Predictive Control, MPC), který je v současné době jedním z nejvíce rozvíjejících se přístupů v automatickém řízení a jako jeden z mála teoretických přístupů je i masivně nasazovaný v praxi tam, kde není zajištěna dostačující kvalita řízení při použití PID regulátorů. Je to dáno skutečností, že první návrhy prediktivního řízení, tzv. DMC (Dynamix Matrix Control) byly navrženy pro účely praxe [1]. V tomto přístupu se hledají akční zásahy, které optimalizují zvolenou účelovou funkci vzhledem na procesní omezení. Důležitým faktorem v MPC je princip predikce, neboli předpovídání budoucího chování systému na základě dostupnosti vhodného matematického modelu. Predikce umožňuje při tomto přístupu řízení „vidět“ do budoucna a optimalizovat akční zásahy potřebné na dosažení daného cíle s minimálním vynaložením energie [2].

První algoritmy prediktivního řízení se už před více než dvaceti pěti lety začaly využívat v průmyslu jako účinný způsob řízení mnohazměrových průmyslových procesů s omezeními. Z důvodů relativně velkých výpočetních nároků bylo použití prediktivního řízení omezeno hlavně na řízení pomalých procesů. V posledních letech byl však zaznamenán i významný pokrok v oblasti zdokonalování a vývoje výpočetních prostředků, včetně nových výkonných numerických metod, a z tohoto hlediska i toto omezení ztrácí význam.

Za jednu z předností prediktivního řízení je schopnost zabudovat do algoritmu prediktivního regulátoru omezení vstupních, výstupních i stavových veličin. Téměř všechny průmyslové procesy taková omezení vykazují. Strategie prediktivního řízení z tohoto důvodu odstraňuje nedostatky existujících optimálních metod, jakými jsou např. Linear Quadratic (LQ) a Linear Quadratic Gaussian (LQG) metody, které pracují na konečném horizontě bez schopnosti řešení omezení.

Metody prediktivního řízení se vyvíjely nezávisle ve třech různých směrech. První směr prediktivního řízení MPC byl publikován v několika příspěvcích už koncem sedmdesátých let minulého století. Druhý směr prediktivního řízení nazvaný GPC (Generalized Predictive Control) byl vyvíjen v oblasti adaptivního řízení [3]. Třetí směr prediktivního řízení označený jako RHC (Receding Horizon Control) byl vyvinut v rámci akademického výzkumu jako alternativa LQ nebo LQG řízení. Stabilizující metoda RHC, minimalizující kvadratické kritérium při koncovém stabilizujícím omezení ve tvaru podmínek rovnosti, byla navržena v příspěvku [4]. Problematika RHC je souhrnně uvedena v monografii [5].

Všechny výše uvedené směry prediktivního řízení byly v jejich začátcích vyvíjeny nezávisle. Začátkem devadesátých let minulého století bylo publikováno několik pokusů o vyjasnění souvislostí mezi jednotlivými trendy a vytvoření určitých způsobů sjednocení těchto směrů [6, 7, 8]. Přehledně o současných metodách prediktivního řízení pojednávají monografie [9, 10, 11, 12, 13].

První fází řešení problémů optimalizace a optimálního řízení je sestavení vhodného matematického modelu, který musí splňovat dva základní požadavky. Jednak musí tento model s dostatečnou přesností popisovat chování uvažovaného procesu ve všech provozních režimech, aby se dal efektivně přetransformovat na matematickou formulaci problému optimálního řízení. Vlastní proces získání optimálního řešení může být realizován buď on-line (opakovaným řešením optimalizačního problému v každé periodě vzorkování pro jednu konkrétní hodnotu počátečních podmínek (viz např. [3]) anebo on-line (získáním optimálního řízení pro všechny možné počáteční podmínky splňující omezení). Off-line řešení [14, 15], rovněž označované jako explicitní prediktivní řízení, je atraktivní především pro řízení procesů s rychlou dynamikou. V tomto přístupu výsledné řešení nabývá podobu vyhledávací tabulky. Proces získání optimálního akčního zásahu při tomto přístupu se potom redukuje na sekvenci jednoduchých vyhledávacích operací, které se dají realizovat v reálném čase v řádu mili- a mikro-sekund.

Pro návrh prediktivních regulátorů je potřeba mít k dispozici model řízeného systému. Při standardně používaných lineárních a nelineárních modelech se stále častěji používají tzv. hybridní modely, což jsou modely kombinující elementy spojité dynamiky a diskrétní logiky. Jako příklad může sloužit chemický reaktor, jehož dynamické chování je popsáno diferenciálními rovnicemi, ale některé akční veličiny mohou nabývat pouze diskrétní hodnoty, jako např. zapnuté a vypnuté chlazení, případně míchání reakční směsi způsobem, kdy jsou otáčky míchadla regulovatelné pouze v nespojitých krocích (např. tři úrovně otáček). Hybridní matematické modely rovněž umožňují popsat elementy rozhodování, jako jsou např. sekvence operací popsaných pomocí IF-THEN-ELSE podmínek. Toto dovoluje velmi efektivně popsat chování nelineárních systémů pomocí metody vícenásobné linearizace. Je třeba připomenout, že i když ve všeobecnosti hybridní modely náležejí do třídy nelineárních systémů, návrh optimálního řízení je nepoměrně jednodušší, když je možné optimalizační problém formulovat jako problém minimalizace účelové funkce za přítomnosti celočíselných proměnných. Pro tuto třídu proměnných existují ve světě programové prostředky (balíky), které takové optimalizační úlohy řeší velmi efektivně [16, 17].

V současné době se používají ve spojitosti s prediktivním řízením rovněž nástroje umělé inteligence - neuronové sítě [18, 19], genetické algoritmy [20,21] a další. Slibnou oblastí pro budoucí výzkum je prediktivní řízení nelineárních systémů pomocí evolučních technik [22], kde

jsou využívány techniky genetického programování, analytického programování či gramatické evoluce.

Metody prediktivního řízení rovněž využívají přístupy založené na více modelech (MM – Multiple Model), kdy pracovní oblast systému je rozdělena na několik pracovních režimů, ve kterých je systém reprezentován lineárním lokálním modelem [23] umožňují snadnější interpretaci lokálních modelů a také snadné využití expertních znalostí pro tvorbu takového modelu. Kombinací těchto lokálních modelů je vytvořen globální dynamický model systému [24].

Teorii a aplikacím prediktivního řízení je věnována celosvětově stále velká pozornost. Skutečnost, že problematika prediktivního řízení není jen předmětem výzkumu na akademických pracovištích, ale teoretické výsledky jsou úspěšně přenášeny do průmyslové praxe, je dokladována v poměrně rozsáhlém přehledu průmyslových aplikací v příspěvcích [25-28].

Na pracovišti Ústavu řízení procesu FAI UTB ve Zlíně byla metoda prediktivního řízení aplikována pro řízení několika laboratorních modelů v reálném čase. V příspěvku [29] je uvedeno prediktivní řízení inverzního kyvadla, náplní příspěvků [30-33] je adaptivní řízení nelineárního servomotoru a obsahem příspěvku [34] je aplikace samočinně se nastavujícího regulátoru pro řízení průtokového tepelného výměníku.

Do návrhu prediktivního řízení je možné zahrnout měřenou poruchovou veličinu, která se zavede do regulátoru dříve, než by se mohla projevit na výstupu regulované soustavy. Tímto se zabývají příspěvky [35-37]. Prediktivním řízením s měřenou poruchovou veličinou u procesů s dopravním zpožděním se zabývá příspěvek [38] a u MIMO procesů příspěvek [39].

## 2 PRINCIP PREDIKTIVNÍHO ŘÍZENÍ

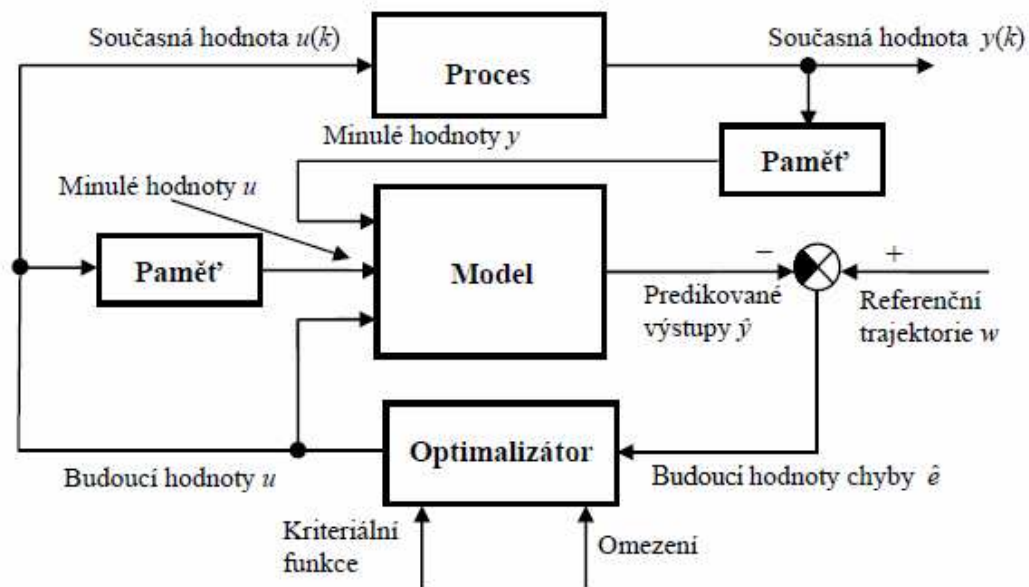
Princip MPC (model predictive control) je znázorněn na obr. 1.

Regulátor obsahuje model systému (diskrétní), který umožňuje z minulých hodnot  $u$  a  $y$  a z budoucích hodnot  $u$  vypočítat (predikovat) budoucí hodnoty  $\hat{y}$

Dále je v regulátoru obsažen Optimalizační člen, který nastavuje budoucí hodnoty  $u$  tak, aby byla splněna kriteriální funkce (a omezující podmínky).

Z optimalizovaných hodnot budoucích akčních zásahů  $u$  je pak na výstup přiveden pouze první z budoucích akčních zásahů.

V dalším kroku se celý postup opakuje, přičemž budoucí hodnoty  $u$  vypočtené v minulém kroku nejsou brány v úvahu, vyjma hodnoty  $u$ , která byla přivedena na vstup řízené soustavy, ta je v tomto kroku minulá hodnota  $u$ , tento postup se nazývá plovoucí horizont.



Obr. 1. Princip prediktivního řízení s modelem

### 2.1 Kriteriální funkce

Kriteriální funkce (účelová funkce) je matematický zápis požadavků na průběh řízené veličiny a akčních zásahů.

Standardní kriteriální funkce má tvar

$$J = E \left\{ \sum_{i=N_1}^{N_2} \delta(i) [\hat{y}(k+i) - w(k+i)]^2 + \sum_{i=1}^{N_u} \lambda(i) [\Delta u(k+i-1)]^2 \right\} \quad (1)$$

kde:  $\hat{y}(k+i)$  je posloupnost predikovaných výstupů,

$w(k+i)$  je posloupnost žádané veličiny,

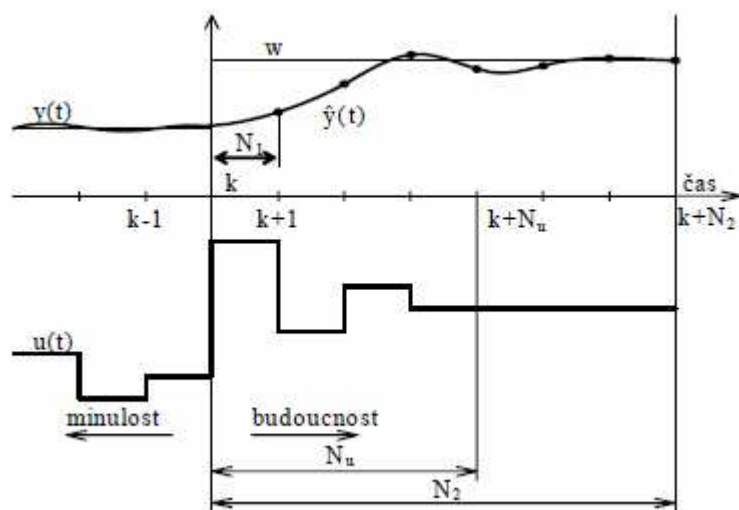
$\Delta u(k+i-1)$  je posloupnost budoucích přírůstků řízení,

$E\{ \}$  je operátor střední hodnoty,

$\delta(i), \lambda(i)$  posloupnost parametrů, jimiž se nastavuje chování výsledného regulátoru, jsou-li  $\delta$  a  $\lambda$  konstanty, pak jejich poměr určuje, jak výrazná bude penalizace změn regulační odchylky a akčních zásahů,

$N_1, N_2$  je minimální a maximální horizont, tyto parametry určují interval v budoucnosti, na kterém je aplikována kriteriální funkce. Minimální horizont bývá často 1, vyšší minimální horizont má smysl u systémů s dopravním zpožděním, popřípadě u systémů s velkou dobou náběhu. Maximální horizont by měl být nastaven tak, aby pokrýval výraznou část přechodové charakteristiky.

$N_u$  je řídicí horizont, za tímto horizontem se již nemění hodnoty akčního zásahu, což snižuje výpočetní náročnost.



Obr. 2. Minimální, Maximální a Řídicí horizont

### 3 NÁVRH PREDIKTORU S MĚŘENOU PORUCHOVOU VELIČINOU

Uvedeme zde odvození prediktivního řízení s měřenou poruchovou veličinou ve smyslu GPC (Generalized Predictive Control). Uvažujme minimální, maximální, řídicí horizont a horizont poruchy:  $N_1=1$ ,  $N_2=5$ ,  $N_u=3$ , a proces popsaný ARX modelem zapsaným rovnicí

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k) + C(z^{-1})v(k) \quad (2)$$

Polynomy  $A(z^{-1})$ ,  $B(z^{-1})$  a  $C(z^{-1})$  jsou zadány takto

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1}, \quad B(z^{-1}) = b_{u1}z^{-1}, \quad C(z^{-1}) = b_{v1}z^{-1}$$

Po dosazení obdržíme rovnici

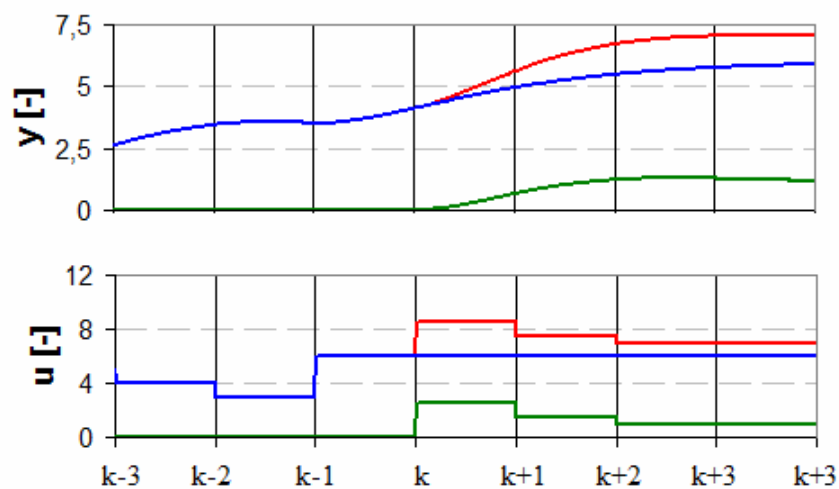
$$(1 + a_1z^{-1})y(k) = b_{u1}z^{-1}u(k) + b_{v1}z^{-1}v(k) \quad (3)$$

V časové reprezentaci pak získáme rovnici

$$y(k) = -a_1y(k-1) + b_{u1}u(k-1) + b_{v1}v(k-1) \quad (4)$$

Predikce systému v GPC se skládá z volné a nucené odezvy, přičemž volná odezva je závislá pouze na minulých hodnotách  $u$  a  $y$ . V případě řízení s měřenou poruchovou veličinou je volná odezva závislá i průběhu poruchové veličiny  $v$ .

Nucená odezva je pak závislá pouze na budoucích hodnotách  $u$ .



Obr. 3. Porovnání volné odezvy (modrá), nucené odezvy (zelená) a celkové odezvy (červená)

### 3.1 Odvození volné odezvy

U volné odezvy platí předpoklad, že členy  $u(k)$  až  $u(k+5)$  jsou rovny  $u(k-1)$ .

Pro snížení výpočetní náročnosti zavedeme na řídicím horizontu  $N_u$  předpoklad nulové změny i pro poruchu. Pak platí  $v(k+3)$  až  $v(k+5)$  jsou rovny  $v(k+2)$ .

Rovnici (4) lze obecně pro libovolný krok  $(k+i)$  volné odezvy zapsat

$$y_0(k+i) = -a_1 y[k+(i-1)] + b_{u1} u(k-1) + b_{v1} v[k+(i-1)] \quad (5)$$

Pro jednotlivé kroky obdržíme predikce výstupu

$$y_0(k+1) = -a_1 y(k) + b_{u1} u(k-1) + b_{v1} v(k) \quad (6)$$

$$y_0(k+2) = -a_1 y_0(k+1) + b_{u1} u(k-1) + b_{v1} v(k+1) \quad (7)$$

$$y_0(k+3) = -a_1 y_0(k+2) + b_{u1} u(k-1) + b_{v1} v(k+2) \quad (8)$$

$$y_0(k+4) = -a_1 y_0(k+3) + b_{u1} u(k-1) + b_{v1} v(k+3) \quad (9)$$

$$y_0(k+5) = -a_1 y_0(k+4) + b_{u1} u(k-1) + b_{v1} v(k+4) \quad (10)$$

Po dosazení rovnice (6) do rovnice (7) pak získáme rovnici

$$y_0(k+2) = -a_1 \cdot [-a_1 y(k) + b_{u1} u(k-1) + b_{v1} v(k)] + b_{u1} u(k-1) + b_{v1} v(k+1) \quad (11)$$

a úpravami obdržíme rovnici

$$y_0(k+2) = a_1^2 y(k) + (1-a_1) b_{u1} u(k-1) - a_1 b_{v1} v(k) + b_{v1} v(k+1) \quad (12)$$

Dosazením rovnice (12) do rovnice (8) obdržíme rovnici

$$\begin{aligned} y_0(k+3) = & -a_1 [a_1^2 y(k) + (1-a_1) b_{u1} u(k-1) - a_1 b_{v1} v(k) + b_{v1} v(k+1)] + \\ & + b_{u1} u(k-1) + b_{v1} v(k+2) = -a_1^3 y(k) + (1-a_1 + a_1^2) b_{u1} u(k-1) + \\ & + a_1^2 b_{v1} v(k) - a_1 b_{v1} v(k+1) + b_{v1} v(k+2) \end{aligned} \quad (13)$$



Po dosazení rovnice (13) do rovnice (9) obdržíme

$$\begin{aligned}
 y_0(k+4) = & -a_1[-a_1^3 y(k) + (1-a_1+a_1^2)b_{u1}u(k-1) + a_1^2 b_{v1}v(k) - \\
 & - a_1 b_{v1}v(k+1) + b_{v1}v(k+2)] + b_{u1}u(k-1) + b_{v1}v(k+2) = a_1^4 y(k) + \\
 & + (1-a_1+a_1^2-a_1^3)b_{u1}u(k-1) - a_1^3 b_{v1}v(k) + a_1^2 b_{v1}v(k+1) + \\
 & + (1-a_1)b_{v1}v(k+2)
 \end{aligned} \tag{14}$$

Poslední krok obdržíme dosazením rovnice (14) do rovnice (10)

$$\begin{aligned}
 y_0(k+5) = & -a_1[a_1^4 y(k) + (1-a_1+a_1^2-a_1^3)b_{u1}u(k-1) - a_1^3 b_{v1}v(k) + \\
 & a_1^2 b_{v1}v(k+1) + (1-a_1)b_{v1}v(k+2)] + b_{u1}u(k-1) + b_{v1}v(k+2) = \\
 & = -a_1^5 y(k) + (1-a_1+a_1^2-a_1^3+a_1^4)b_{u1}u(k-1) + a_1^4 b_{v1}v(k) - \\
 & - a_1^3 b_{v1}v(k+1) + (1-a_1+a_1^2)b_{v1}v(k+2)
 \end{aligned} \tag{15}$$

Přepisem rovnic (6) a (12) až (15) do maticového tvaru dostaneme

$$\begin{bmatrix} y_0(k+1) \\ y_0(k+2) \\ y_0(k+3) \\ y_0(k+4) \\ y_0(k+5) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1 & b_{u1} & b_{v1} & 0 & 0 \\ a_1^2 & (1-a_1)b_{u1} & -a_1 b_{v1} & b_{v1} & 0 \\ -a_1^3 & (1-a_1+a_1^2)b_{u1} & a_1^2 b_{v1} & -a_1 b_{v1} & b_{v1} \\ a_1^4 & (1-a_1+a_1^2-a_1^3)b_{u1} & -a_1^3 b_{v1} & a_1^2 b_{v1} & (1-a_1)b_{v1} \\ -a_1^5 & (1-a_1+a_1^2-a_1^3+a_1^4)b_{u1} & a_1^4 b_{v1} & -a_1^3 b_{v1} & (1-a_1+a_1^2)b_{v1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y(k) \\ u(k-1) \\ v(k) \\ v(k+1) \\ v(k+2) \end{bmatrix} \tag{16}$$

### 3.2 Odvození nucené odezvy

Pro nucenou odezvu platí předpoklad, že  $y(k)$  a také všechny poruchy  $v$  jsou nulové.

Vzhledem k uvažovanému řídicímu horizontu ( $Nu=3$ ) platí, že členy  $u_f(k+3)$  a  $u_f(k+4)$  jsou rovny  $u_f(k+2)$ .

Rovnici (4) lze pro krok  $(k+i)$  nucené odezvy zapsat

$$y_f(k+i) = -a_1 y[k+(i-1)] + b_{u1} u_f[k+(i-1)] \tag{17}$$

Pro jednotlivé kroky pak získáme rovnice

$$y_f(k+1) = b_{u1}u_f(k) \quad (18)$$

$$y_f(k+2) = -a_1y_f(k+1) + b_{u1}u_f(k+1) \quad (19)$$

$$y_f(k+3) = -a_1y_f(k+2) + b_{u1}u_f(k+2) \quad (20)$$

$$y_f(k+4) = -a_1y_f(k+3) + b_{u1}u_f(k+3) \quad (21)$$

$$y_f(k+5) = -a_1y_f(k+4) + b_{u1}u_f(k+4) \quad (22)$$

Dosazením rovnice (18) do rovnice (19) získáme rovnici

$$y_f(k+2) = -a_1[b_{u1}u_f(k)] + b_{u1}u_f(k+1) = -a_1b_{u1}u_f(k) + b_{u1}u_f(k+1) \quad (23)$$

Po dosazení (23) do (20) dostaneme

$$y_f(k+3) = -a_1[-a_1b_{u1}u_f(k) + b_{u1}u_f(k+1)] + b_{u1}u_f(k+2) = a_1^2b_{u1}u_f(k) - a_1b_{u1}u_f(k+1) + b_{u1}u_f(k+2) \quad (24)$$

následující krok obdržíme z rovnice (24) a (21)

$$y_f(k+4) = -a_1[a_1^2b_{u1}u_f(k) - a_1b_{u1}u_f(k+1) + b_{u1}u_f(k+2)] + b_{u1}u_f(k+2) = -a_1^3b_{u1}u_f(k) + a_1^2b_{u1}u_f(k+1) + (1-a_1)b_{u1}u_f(k+2) \quad (25)$$

Poslední krok získáme dosazením rovnice (25) do rovnice (22)

$$y_f(k+5) = -a_1[-a_1^3b_{u1}u_f(k) + a_1^2b_{u1}u_f(k+1) + (1-a_1)b_{u1}u_f(k+2)] + b_{u1}u_f(k+2) = a_1^4b_{u1}u_f(k) - a_1^3b_{u1}u_f(k+1) + (1-a_1+a_1^2)b_{u1}u_f(k+2) \quad (26)$$

Přepisem rovnic (23) až (26) do maticového tvaru získáme rovnici

$$\begin{bmatrix} y_f(k+1) \\ y_f(k+2) \\ y_f(k+3) \\ y_f(k+4) \\ y_f(k+5) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{u1} & 0 & 0 \\ -a_1b_{u1} & b_{u1} & 0 \\ a_1^2b_{u1} & -a_1b_{u1} & b_{u1} \\ -a_1^3b_{u1} & a_1^2b_{u1} & (1-a_1)b_{u1} \\ a_1^4b_{u1} & -a_1^3b_{u1} & (1-a_1+a_1^2)b_{u1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_f(k) \\ u_f(k+1) \\ u_f(k+2) \end{bmatrix} \quad (27)$$

pro lineární systémy musí pro hodnoty  $u(k)$ ,  $u(k+1)$ ,  $u(k+2)$  platit

$$u(k) = u_f(k) + u(k-1)$$

$$u(k+1) = u_f(k+1) + u(k-1)$$

$$u(k+2) = u_f(k+2) + u(k-1)$$

### 3.2.1 Ilustrační příklad

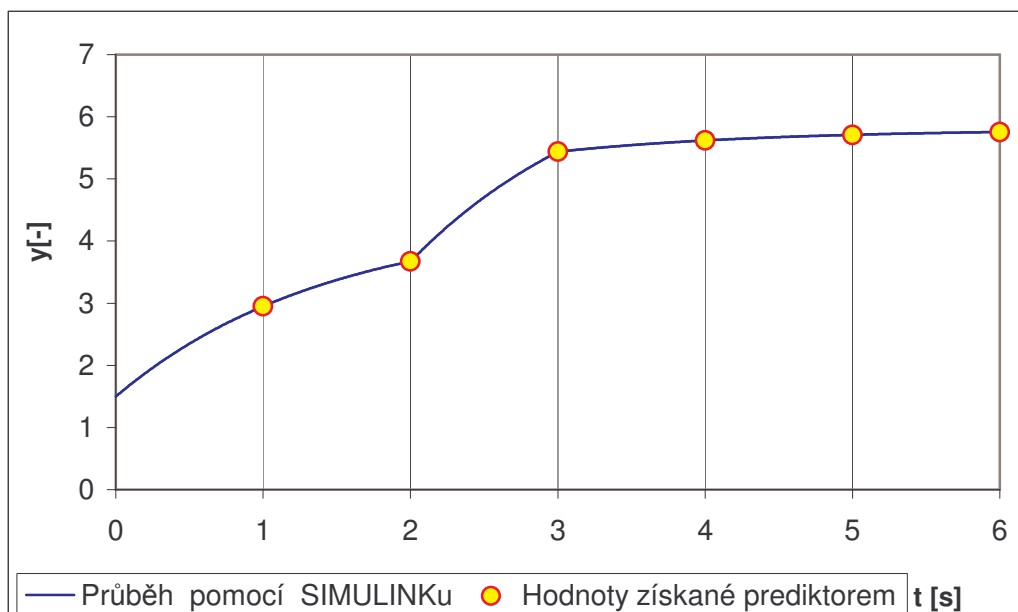
Mějme soustavu zadanou parametry  $b_{u1} = 3$ ,  $b_{v1} = -2$ ,  $a_1 = -0.5$  a hodnotami  $u$  a  $v$  zadány v tabulce 1.

Tab.1 Průběhy  $u$ ,  $v$

|     | k-1 | k   | k+1 | k+2 |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| $u$ | 1   | 1.2 | 1.4 | 1.1 |
| $v$ | 0.4 | 0.7 | 0.3 | 0.2 |

Dále mějme zadanou hodnotu  $y(k-1) = 1.5$ .

Pak výpočtem hodnot  $y_0$  z rovnice (16) a  $y_f$  z rovnice (27) a následným sečtením  $y = y_f + y_0$ , získáme hodnoty, které jsou vyneseny v grafu na obr. 4. společně s hodnotami získanými simulací pomocí nadstavby SIMULINK pro programové prostředí MATLAB.



Obr. 4. Srovnání hodnot získaných simulací a hodnot vypočtených prediktorem

### 3.3 Omezující podmínky

V praxi se velmi často setkáváme s omezeními (constraints). Často se jedná o fyzická omezení ať už senzorů, či akčních členů, technologická či jiná omezení procesů. Nejčastěji jsou omezovány veličiny na vstupu, které mohou pracovat pouze v určitém rozsahu hodnot.

Schopnost práce s omezeními je jednou z hlavních předností prediktivního řízení, která měla vliv na rozšíření MPC v průmyslu. Velké množství průmyslových procesů je totiž řízeno na hodnotách blížících se omezujícím podmínkám, nebo přímo na nich. Z tohoto faktu vyplývá požadavek na optimální řízení v rámci omezení. Nejjednodušším a v praxi nejpoužívanějším způsobem aplikace omezení je analytické řešení optimalizační úlohy bez omezení a následná aplikace omezení - saturace na výsledek. Toto řešení je jednoduché, ale nezaručí optimální řízení podle námi zvolených kritérií. Další nevýhodou je také to, že takovéto omezení lze aplikovat pouze na veličiny vystupující z algoritmu optimalizace (akční zásah a změna akčního zásahu). Vhodnějším řešením je tedy řešit optimalizační úlohu již s danými omezeními [40].

**Omezení rozlišujeme jako tvrdá (hard constraints) a měkká (soft constraints) :**

- Tvrdá omezení jsou fyzická omezení procesů, jejichž hranice v prostoru řešení nelze za žádných okolností překročit.
- Měkká omezení jsou ta, která mohou být za určitých podmínek porušena.

**Nejčastěji používaná tvrdá omezení jsou následující :**

omezení změny akčního zásahu:  $\Delta u_{\min} \leq u(k+j) - u(k+j-1) \leq \Delta u_{\max}$

omezení akčního zásahu:  $u_{\min} \leq u(k+j) \leq u_{\max}$

omezení výstupní veličiny:  $y_{\min} \leq y(k+j) \leq y_{\max}$

omezení překmitu:  $y(k+j) \leq w(k+j)$  pro  $j=N_1, \dots, N_2$  [40]

Do funkce *quadprog*, která je v této práci využita k minimalizaci kritériální funkce se mezení zapisují nerovnicí:

$$Au \leq b$$

Označíme-li minimální přípustnou hodnotu nuceného akčního zásahu jako  $u_{f\_max}$  a minimální hodnotu  $u_{f\_min}$ , můžeme napsat maticové rovnice:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_f(k) \\ u_f(k+1) \\ u_f(k+2) \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} u_{f\_max}(k) \\ u_{f\_max}(k+1) \\ u_{f\_max}(k+2) \end{bmatrix}$$

(28)

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_f(k) \\ u_f(k+1) \\ u_f(k+2) \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} -u_{f\_min}(k) \\ -u_{f\_min}(k+1) \\ -u_{f\_min}(k+2) \end{bmatrix}$$

Přičemž, abychom dosáhli omezení výstupní veličiny  $u$  na intervalu  $\langle u_{min}, u_{max} \rangle$  je nutné v každém kroku regulace přepočítat hodnotu  $u_{f\_max}$ , popř.  $u_{f\_min}$  podle rovnice

$$u_{f\_max}(k) = u_{max} - u(k-1)$$

$$u_{f\_min}(k) = u_{min} - u(k-1)$$

## II. PRAKTICKÁ ČÁST

## 4 IDENTIFIKACE SOUSTAVY

K ověření vlastností regulátoru byl vybrán laboratorní model servomechanismu AMIRA DR300, který je tvořen dvěma motory. Jeden z motorů je zapojen jako generátor a slouží k vytvoření zátěže pro druhý motor.

Jako vstupní veličina je zde napětí vstupující do motoru  $u$ , výstupní veličinou  $y$  jsou pak výstupní otáčky a poruchová veličina je napětí na zatěžovacím motoru  $v$ .



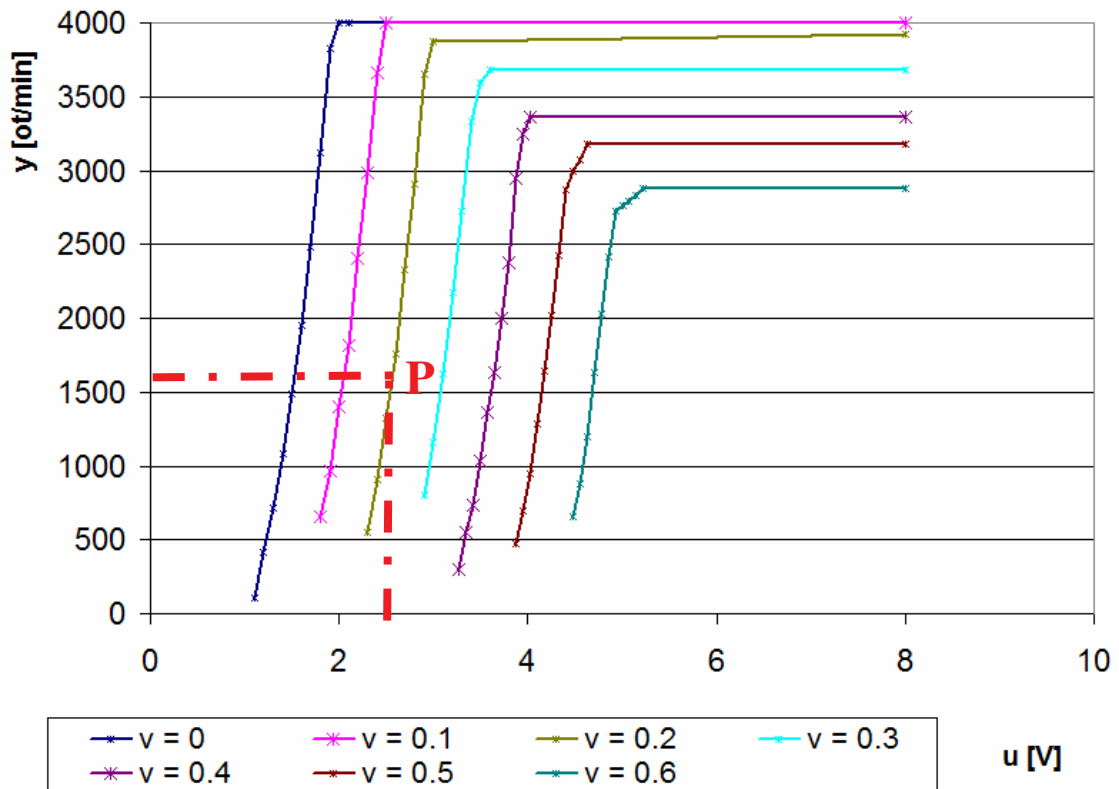
Obr. 5. Servomechanismus AMIRA DR300

Po prozkoumání vlastností soustavy jsem zvolil přenos, jehož parametry se budou při identifikaci hledat pro ARX model 1. řádu.

$$y = \frac{b_{u1}}{z + a_1} u + \frac{b_{v1}}{z + a_1} v \quad (29)$$

Byl vytvořen program pro identifikaci z experimentálních dat v programovém prostředí MATLAB.

#### 4.1 Volba pracovního bodu



Obr. 6. Statická charakteristika

Na základě statické charakteristiky jsem si zvolil pracovní bod

$$u_p = 2.55\text{V} \quad y_p = 1760 \text{ ot/min} \quad v_p = 2\text{V}$$

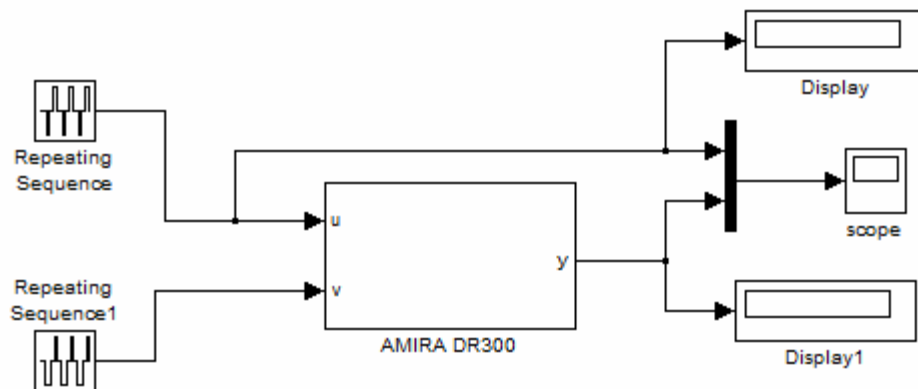
#### 4.2 Získání experimentálních dat

Aby bylo možné provést identifikaci, bylo nutné naměřit průběhy výstupní veličiny v závislosti na různých kombinacích vstupní veličiny a poruchy. Jednotlivé kombinace vstupní veličiny a poruchy, které jsou v tabulce 2, byly zadány do simulinkového schématu na obr. 7. jako posloupnost skoků s trváním 20s.

Tab. 2 Kombinace vstupní veličiny a poruchy.

|     |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $u$ | 0.2   | 0.175 | 0.175 | 0.175 | 0.2   | 0.2   | 0.225 |
| $v$ | 0.255 | 0.255 | 0.245 | 0.255 | 0.255 | 0.265 | 0.265 |





Obr. 7. Simulační schéma pro získání experimentálních dat

Dále byl vytvořen soubor typu m-file s názvem „Identifikace.m“, který určí neznámé parametry modelu daného rovnicí (29). Data byla nejprve převedena do tvaru odchylek od pracovního bodu:

$$u = u_n - u_p$$

$$v = v_n - v_p$$

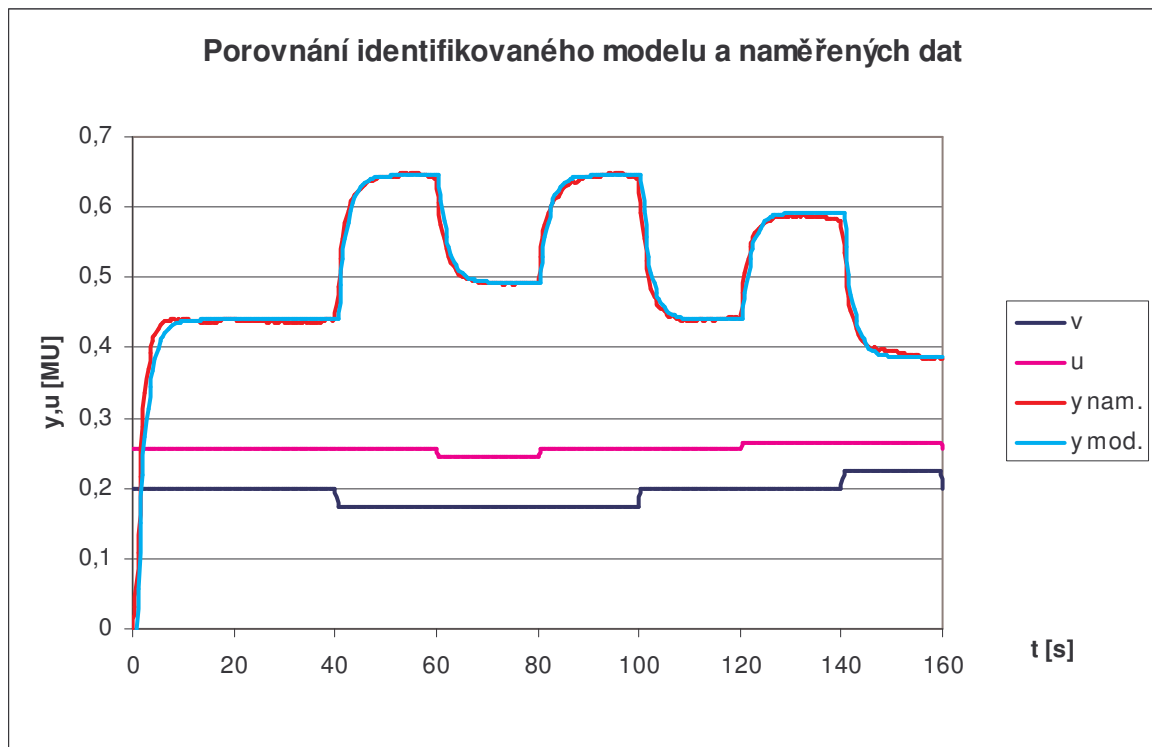
$$y = y_n - y_p$$

kde  $u_n$ ,  $v_n$ ,  $y_n$  jsou naměřené hodnoty a  $u_p$ ,  $v_p$ ,  $y_p$  jsou hodnoty pracovního bodu

a následně byly, pomocí příkazu `fminsearch`, který hledá minimum zadaného kritéria nalezeny hledané parametry:

$$y = \frac{3,687}{z - 0,7575}u + \frac{-1,989}{z - 0,7575}v$$

Tento přenos popisuje servomechanismus za předpokladu, že jsou všechny vstupy a výstupy vztaheny k pracovnímu bodu. U regulátoru navrženého pro tento přenos bude tedy také nutné vztáhnout všechny vstupy a výstupy k pracovnímu bodu.

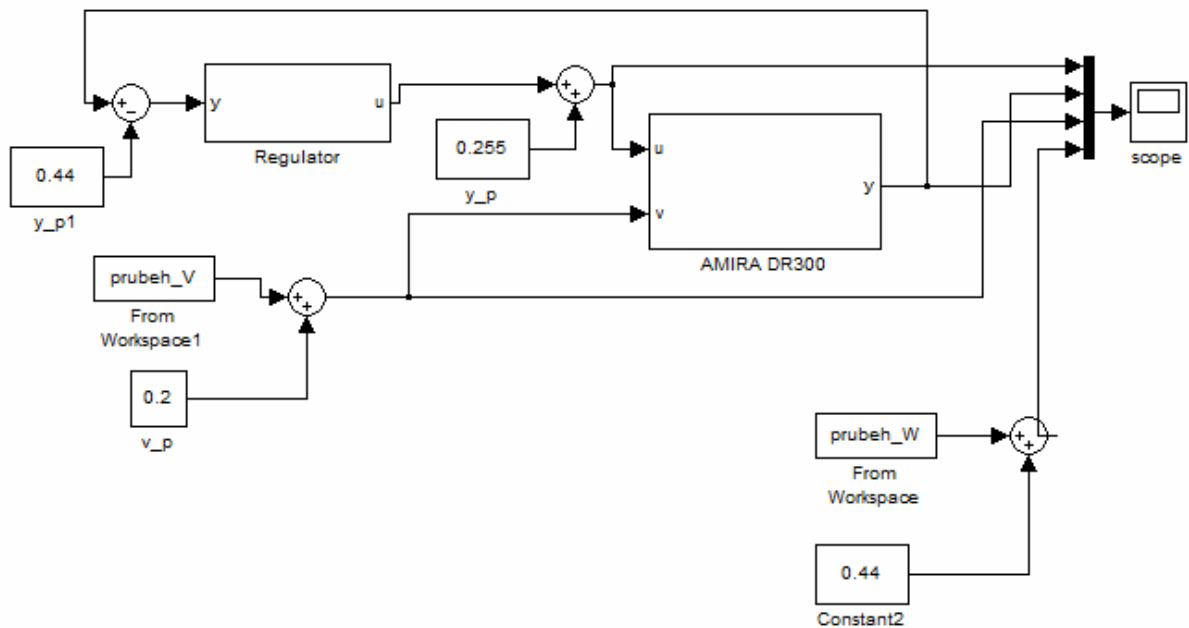


Obr. 8. Porovnání naměřených dat a identifikovaného přenosu soustavy

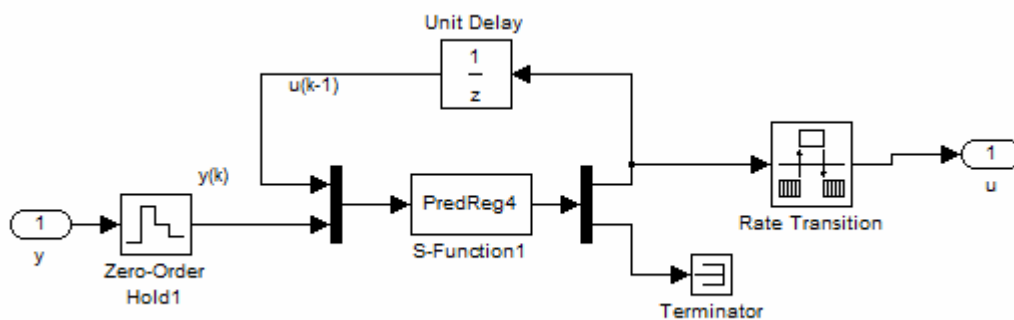
Z obr. 8 vyplývá, že pro identifikaci byla zvolena vhodná metoda, poněvadž naměřená výstupní data odpovídají datům získanými na výstupu z modelu.

## 5 NÁVRH REGULÁTORU

Regulátor je zapsán do bloku S-Function. Průběhy žádané veličiny a poruchové veličiny jsou uloženy ve vektorech, které jsou regulátoru zadány jako vstupní parametry společně s hodnotou  $\lambda$ .



Obr. 9. Simulační schéma zapojení regulátoru



Obr. 10. Simulační schéma vnitřní struktury subsystému regulátoru

## 5.1 Výpočet rovnice pro QUADPROG

Abychom mohli pro optimalizaci kritériální funkce použít příkaz quadprog, je nutné nejdříve převést kritériální funkci (1) do požadovaného tvaru:

$$\min_x \frac{1}{2} x^T H x + f^T x \quad (30)$$

Převědeme-li kritériální funkci do maticového tvaru pak obdržíme:

$$J = E^T E + \lambda \Delta U^T \Delta U \quad (31)$$

Regulační odchylku můžeme zapsat

$$E = W - Y_0 - Y_f \quad (32)$$

Dále můžeme zapsat

$$\Delta U = R.U \quad (33)$$

$$\text{kde } R = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Označíme-li matici nucené odezvy  $F$  (viz rovnici (27)), pak

$$Y_f = F.U \quad (34)$$

Dosažením rovnic (32), (33) a (34) do rovnice (31) dostaneme

$$J = (W - Y_0 - F.U)^T (W - Y_0 - F.U) + \lambda.R.U^T R.U \quad (35)$$

a po roznásobení obdržíme

$$J = (W - Y_0)^T (W - Y_0) + (W - Y_0)^T (-F.U) - (F.U)^T (W - Y_0) + (F.U)^T (F.U) + \lambda.U^T R^T .R.U \quad (36)$$

Dalšími úpravami získáme rovnici

$$J = (W - Y_0)^T (W - Y_0) - 2(W - Y_0)F.U + U(F^T F + \lambda.R^T)U \quad (37)$$

První člen není závislý na  $U$ , takže jej můžeme z rovnice vypustit, pak získáme rovnici

$$J = -2(W - Y_0)F.U + U(F^T F + \lambda.R^T)U \quad (38)$$

## 5.2 Algoritmus regulátoru

V každém kroku jsou prováděny následující činnosti:

- 1) Načteme  $u(k-1)$  a  $y(k)$  jako vstupy.
- 2) Načteme  $v(k)$  až  $v(k+2)$  a  $w(k)$  až  $w(k+5)$  z vektorů *prubeh\_V* a *prubeh\_W*, které jsou regulátoru předány jako parametry a obsahují kompletní průběh požadované veličiny a měřené poruchy.
- 3) Vypočítáme volnou odezvu z rovnice (16).
- 4) Vypočítáme omezující matice:

$$\begin{aligned} \text{platí-li} \quad u(k) &= u_f(k) + u(k-1) \\ u(k+1) &= u_f(k+1) + u(k-1) \\ u(k+2) &= u_f(k+2) + u(k-1) \end{aligned}$$

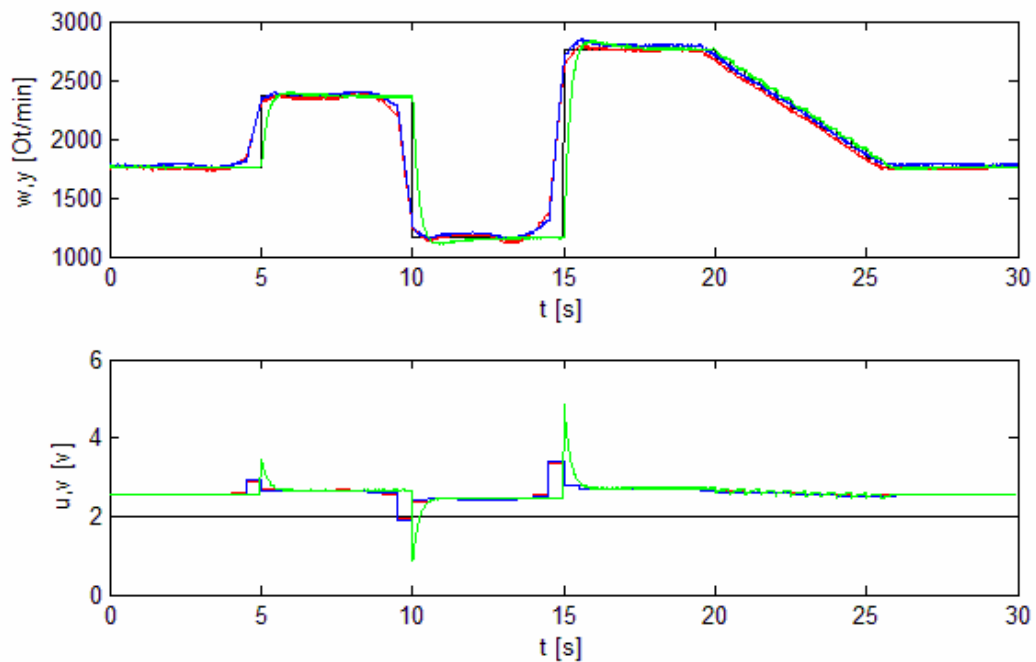
a chceme-li mít maximální akční zásah roven  $u_{\max}$

$$\text{pak } u_{f_{\max}}(k) = u_{\max} - u(k-1).$$

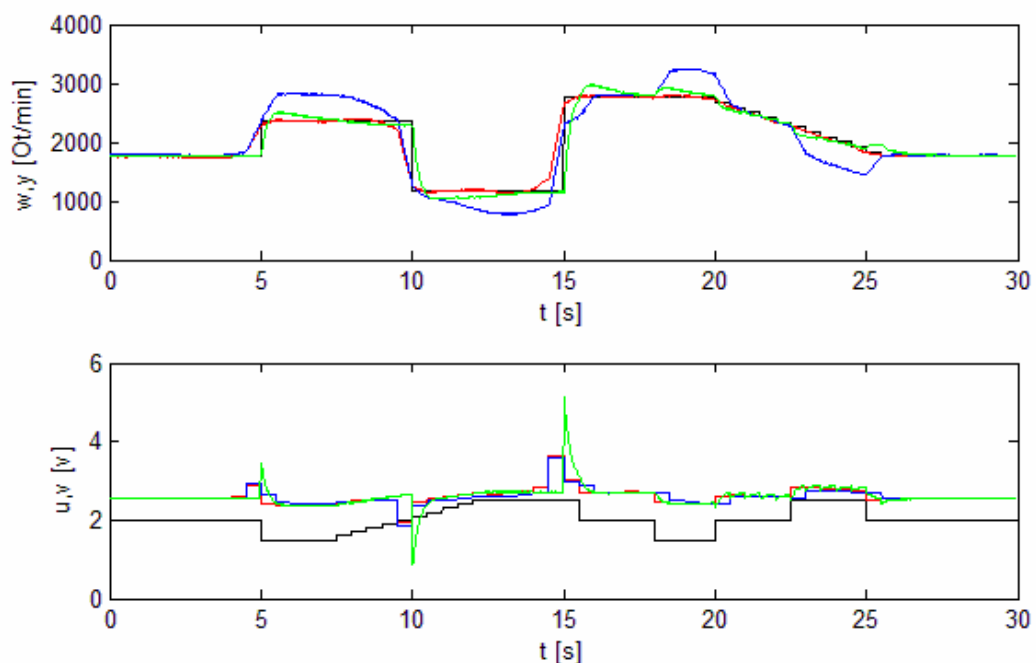
- 5) Vypočítáme  $u_f(k)$  pomocí příkazu `quadprog`, který minimalizuje kriteriální funkci danou rovnicí (38). Výstupem jsou  $u_f(k)$  až  $u_f(k+2)$ .
- 6) Vypočítáme  $u(k) = u_f(k) + u(k-1)$  a vložíme na výstup regulátoru.
- 7) Celý postup opakujeme.

## 5.3 Srovnání prediktivního regulátoru a PID regulátoru

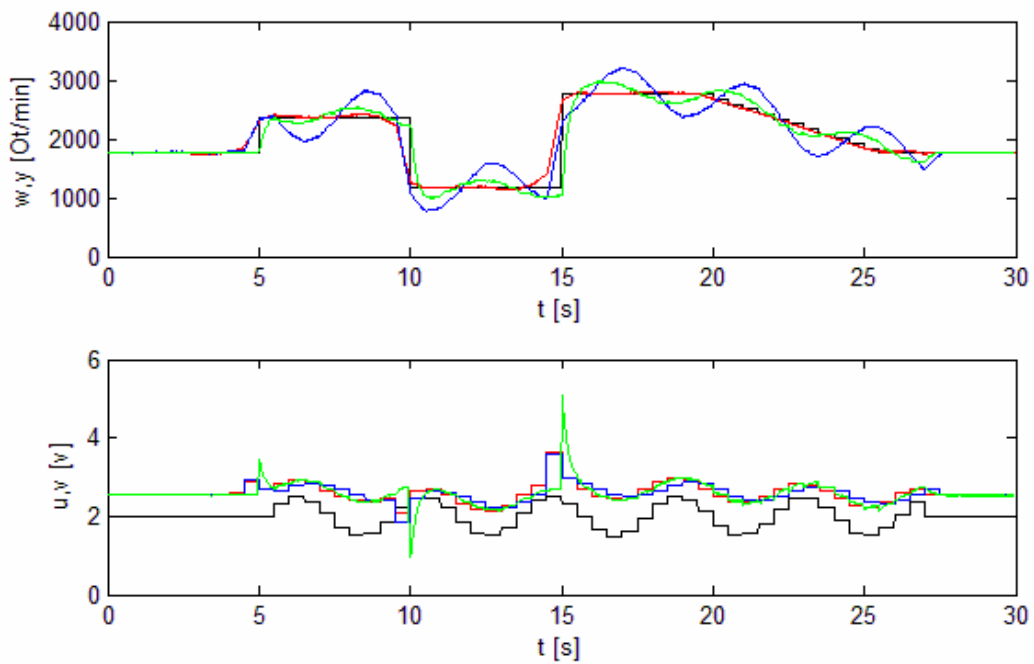
Provedl jsem porovnání prediktivního regulátoru s měřenou poruchovou veličinou s regulátorem bez zahrnutí poruchové veličiny do výpočtu a se spojitým PID regulátorem, který byl navržen metodou inverze dynamiky. Parametr  $T_w$  byl volen 0.5.



Obr. 11. Porovnání pred. reg. s měřenou poruchou (červeně), pred. reg. bez měřené poruchy (modře) a spojitého PID regulátoru (zeleně) pro regulační pochod neobsahující změny poruchové veličiny (černě), žádaná hodnota (černě)



Obr. 12. Porovnání pred. reg. s měřenou poruchou (červeně), pred. reg. bez měřené poruchy (modře) a spojitého PID regulátoru (zeleně) pro regulační pochod s poruchovou veličinou (černě) ve tvaru skoku, žádaná hodnota (černě)

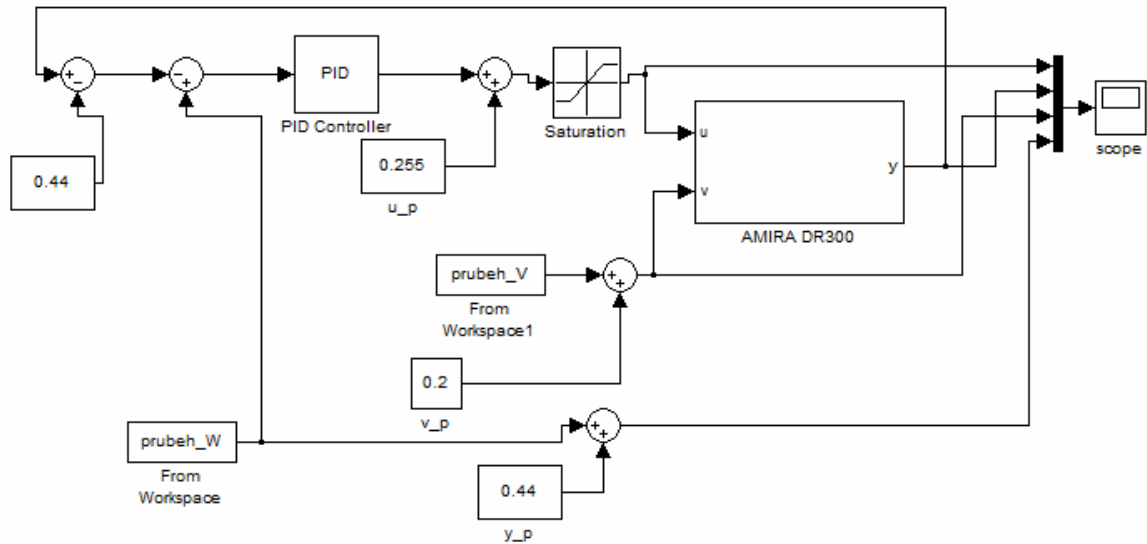


Obr. 13. Porovnání pred. reg. s měřenou poruchou (červeně), pred. reg. bez měřené poruchy (modře) a spojitého PID regulátoru (zeleně) pro regulační pochod s poruchovou veličinou (černě) ve tvaru funkce sinus, žádaná hodnota (černě)

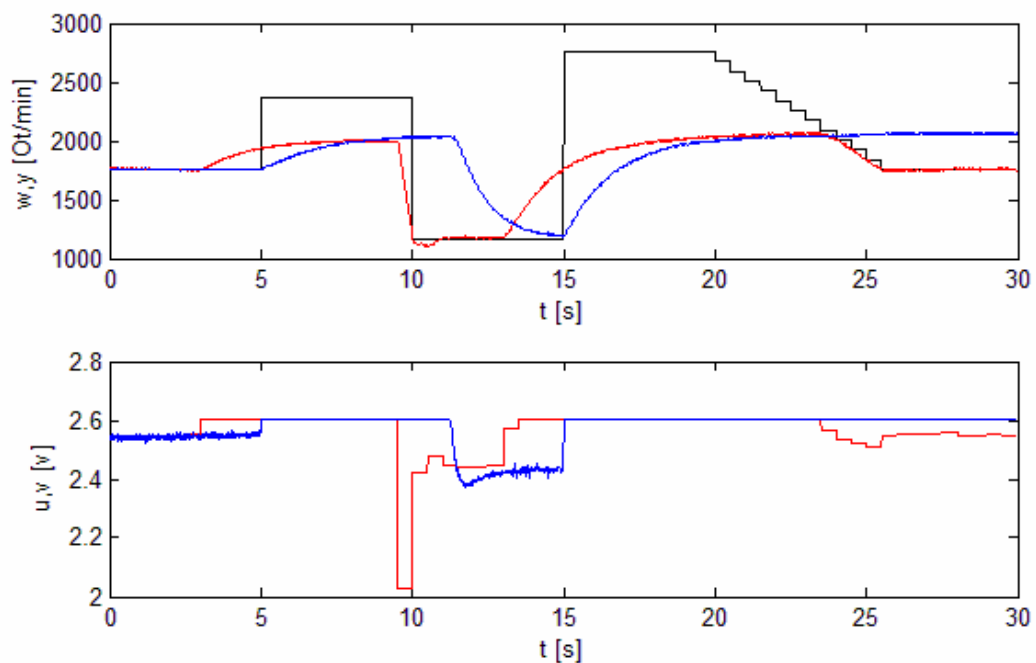
Z obr. 12 a 13 je zřejmé, že regulátor je opravdu schopen zcela potlačit poruchovou veličinu. Je zde také vidět, že PID regulátor potlačuje poruchu lépe, než prediktivní regulátor bez měřené poruchové veličiny zahrnuté ve výpočtech, což potvrzuje vyšší robustnost PID regulátorů.

## 6 OMEZENÍ AKČNÍHO ZÁSAHU

Abych ověřil schopnost prediktivního regulátoru, snížil jsem maximální hodnotu akčního zásahu na 2.6 V (0.05V od pracovního bodu). Také jsem použil PID regulátor z předchozí kapitoly a rovněž jej omezil za pomoci bloku saturation.



Obr. 14. Simulační schéma zapojení PID regulátoru s omezením akčního zásahu



Obr. 15. Porovnání regulačního průběhu s omezením akčního zásahu, PID – modře, prediktivní regulátor - červeně



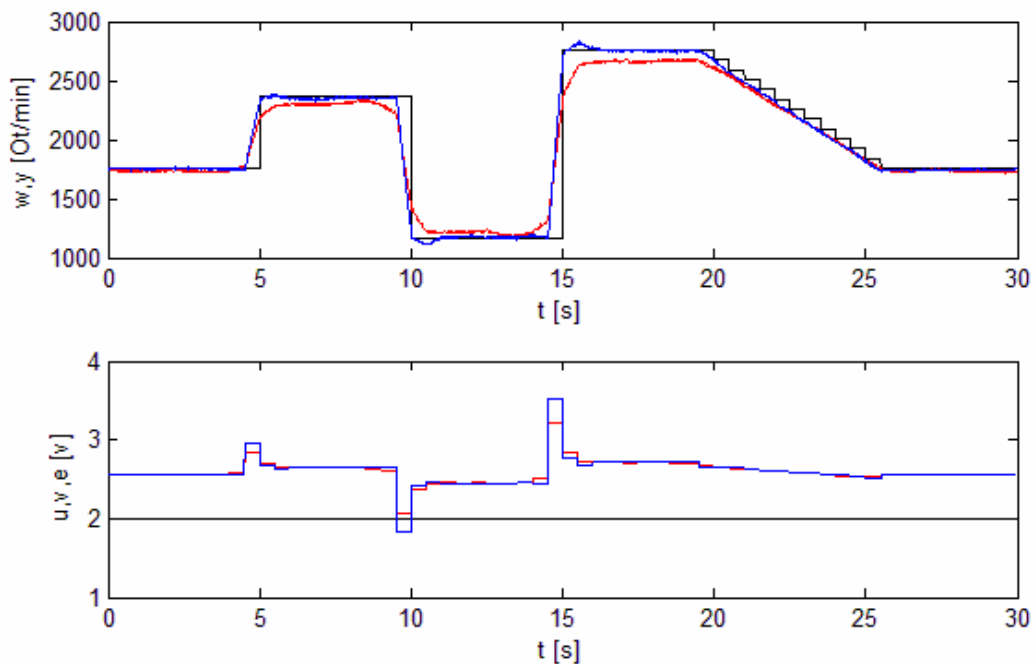
Hodnotu 2.6 V jsem volil záměrně tak, aby část průběhu žádané veličiny ležela v oblasti otáček, jež nelze při tomto omezení dosáhnout, avšak část průběhu žádané veličiny ležela v dosažitelné oblasti. Z obr. 15 je patrné, že PID regulátor trpí v takovém případě přesycením (Wind-up efekt). Regulátor není po dlouhou dobu schopen dosáhnout nulové regulační odchylky. Celou tuto dobu dochází díky integrační složce regulátoru k růstu akčního zásahu, daleko nad omezení, díky čemuž trvá dlouho, než opět klesne na správnou hodnotu. Z obr. 15 je také patrné, že prediktivní regulátor se s tímto problémem vyrovná a ve chvíli, kdy žádaná hodnota klesne na úroveň již je možné dosáhnout, pokračuje regulátor v činnosti stejně jako by nikdy na žádné omezení nenarazil.

## 7 ROBUSTNOST

Abych ověřil robustnost regulátoru, provedl jsem přepočítání hodnoty regulátoru na přenos, který má o 30% vyšší zesílení, než jaké bylo skutečně naměřeno a porovnal jsem regulátor nastavený dle správného přenosu s regulátorem nastaveným dle přenosu o 30% zkresleného. Také jsem provedl pro srovnání přepočet hodnot PID regulátoru a stejné porovnání.

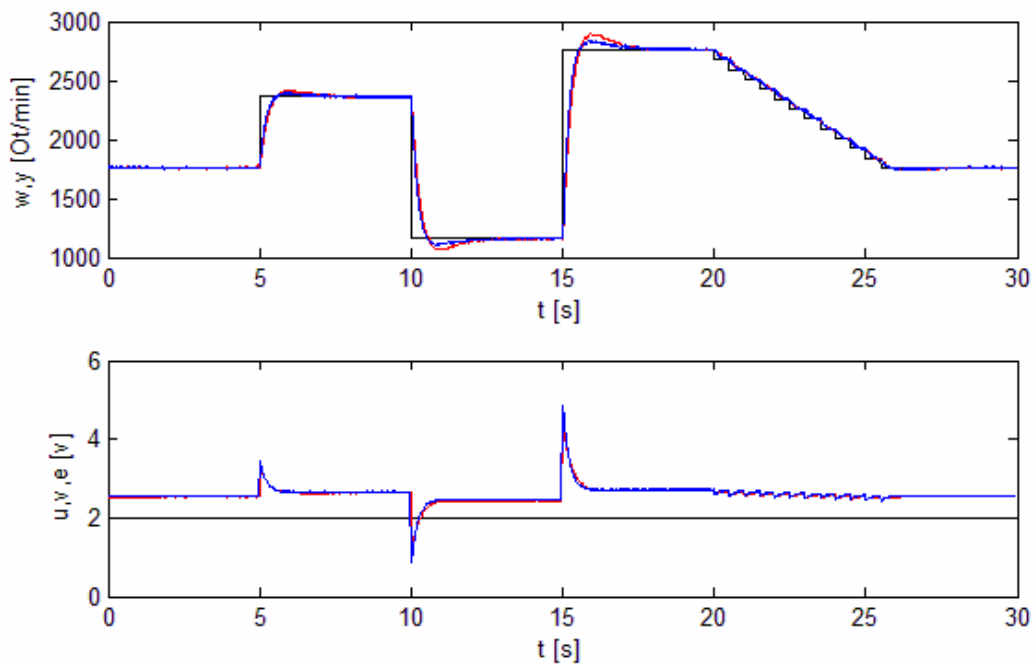
$$\text{Správný přenos: } y = \frac{3,687}{z - 0,7575}u + \frac{-1,989}{z - 0,7575}v$$

$$\text{Zesílený přenos : } y = \frac{4,784}{z - 0,7575}u + \frac{-1,989}{z - 0,7575}v$$



Obr. 16. Robustnost prediktivního regulátoru. Regulátor vypočítaný ze správného přenosu(modře), regulátor vypočítaný ze zesíleného přenosu(červeně)

Z naměřených dat vyplývá, že regulátor není schopen dosáhnout nulové regulační odchylky, není-li model řízené soustavy, ze které je regulátor počítán zcela správný. Tento jev zřejmě vyplývá z faktu, že regulátor neminimalizuje aktuální regulační odchylku v daném kroku  $e(k)$ , ale regulační odchylky predikované, tedy závislé na modelu systému.



Obr. 17. Robustnost PID regulátoru. Regulátor vypočítaný ze správného přenosu(modře), regulátor vypočítaný ze zesíleného přenosu(červeně)

Pro srovnání jsem naměřil také regulaci PID regulátorem, jež byl vypočítán na základě správného přenosu a zkresleného přenosu. Z obr. 17 vyplývá, že PID regulátor i s nepřesným přenosem reguluje velmi podobně.

Prediktivní regulátor tedy není oproti jiným typům regulátorů příliš robustní. Toto lze napravit například použitím adaptace, nebo kombinací prediktivního a jednoduššího robustního typu regulátoru, což podrobněji rozeberu v kapitole 9.

## 8 PARAMETRY REGULÁTORU

Mezi základní parametry, kterými lze ovlivňovat průběh regulačního pochodu patří například omezení maximální a minimální hodnoty akčního zásahu, což bylo ukázáno v kapitole 6.

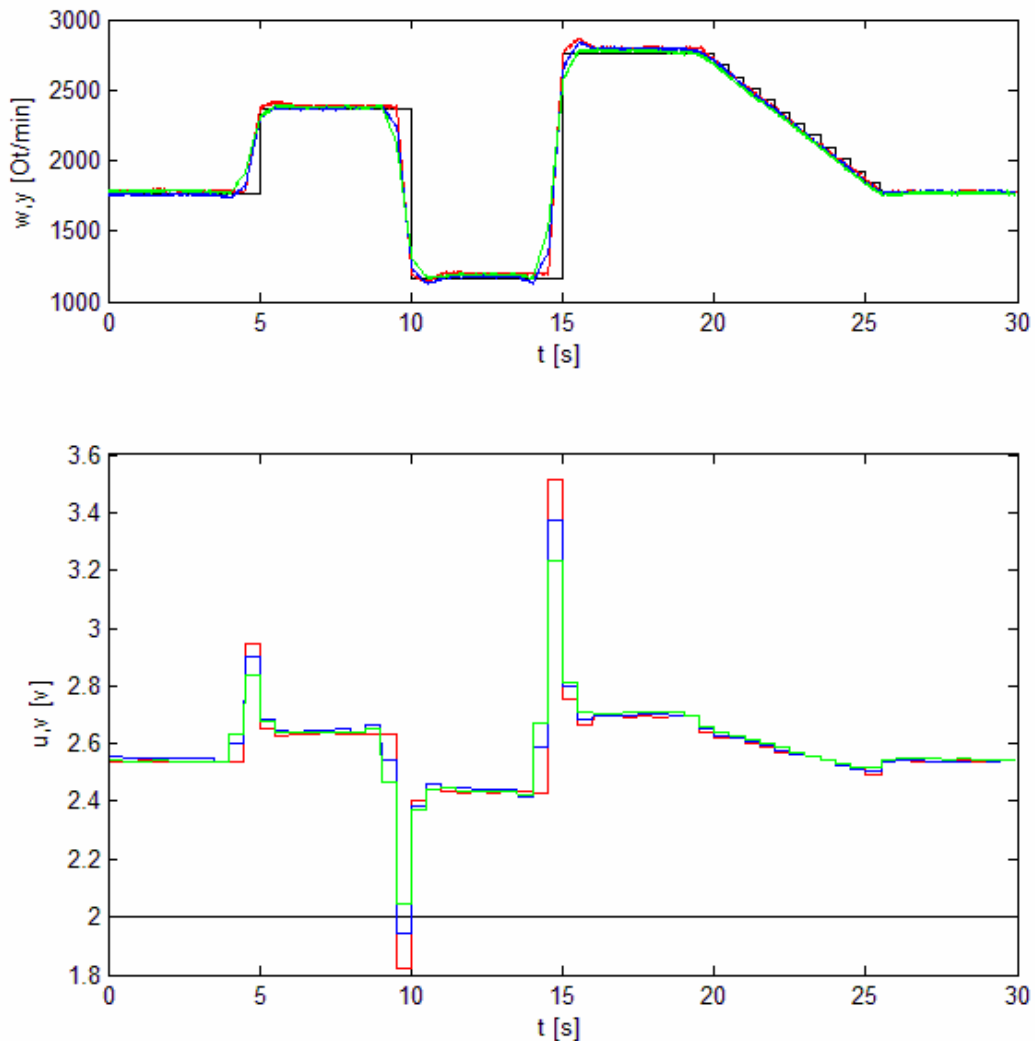
Dalším parametrem, kterým lze měnit průběh regulačního pochodu je úroveň penalizace změn akčních zásahů  $\lambda$ .

Důvodů, proč penalizovat změny akčních zásahů může být mnoho. U tohoto konkrétního modelu je akční veličina napětí, což je fyzikální veličina velmi rychle nastavitelná. Vzhledem k dynamice procesu jsou časy nutné na změnu napětí o jakoukoliv hodnotu naprosto zanedbatelné. Existuje však mnoho procesů, u kterých se nemění akční veličina tak rychle, u nich bude penalizace akčních zásahů velký přínos.

Další parametry, které výrazně ovlivňují regulační pochod jsou minimální, maximální a řídicí horizont. Maximální horizont udává, kolik kroků do budoucnosti bude predikována výstupní veličina. Minimální horizont udává, od kolikátého kroku v budoucnosti bude minimalizována kritériální funkce, což je podstatné v případě soustav neminimálně fázových nebo soustav s dopravním zpožděním.

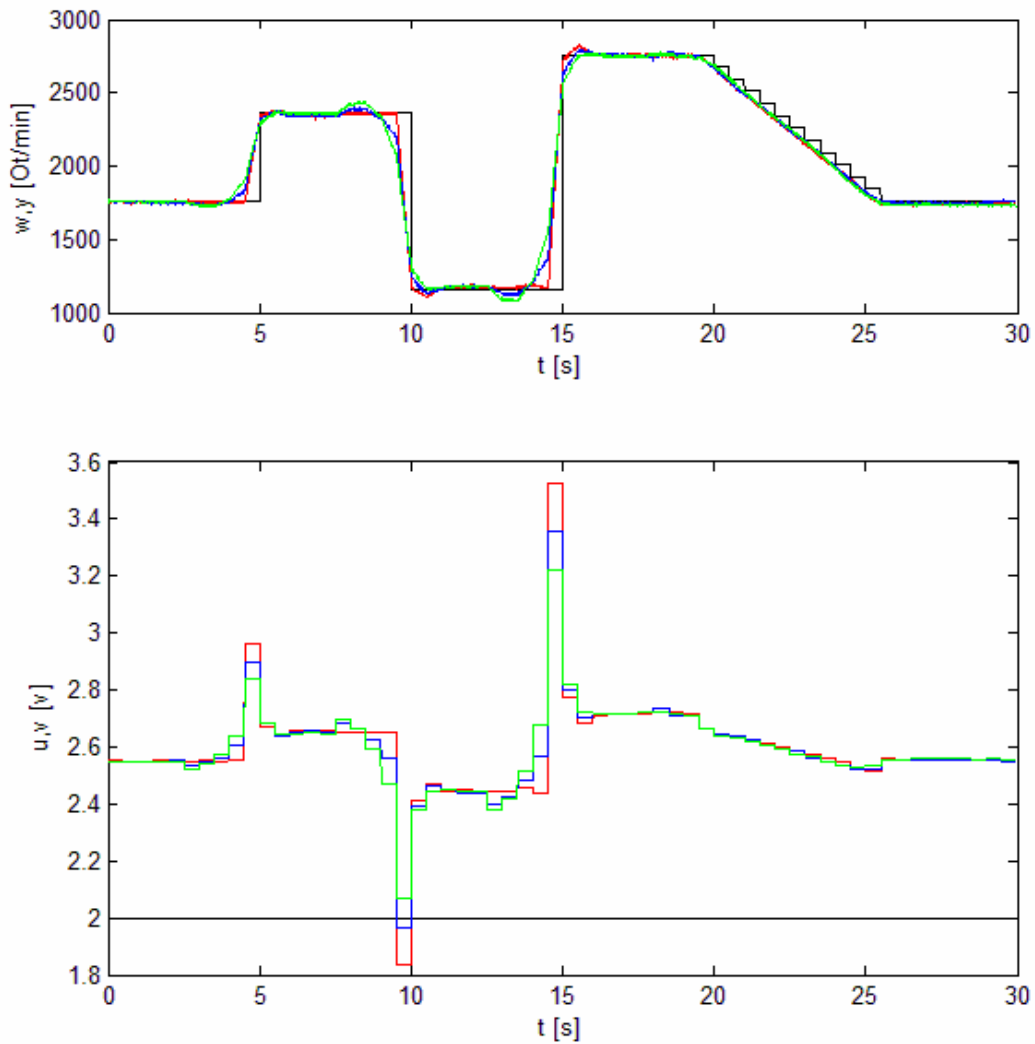
Naměřil jsem mnoho průběhů řízení jak pro různé nastavení parametru  $\lambda$ , tak pro různé hodnoty maximálního horizontu.

Různá nastavení budou porovnána jak s ohledem na regulační pochod, kde nedochází k poruchám, tak také pro regulační pochody, kde k poruchám dochází.



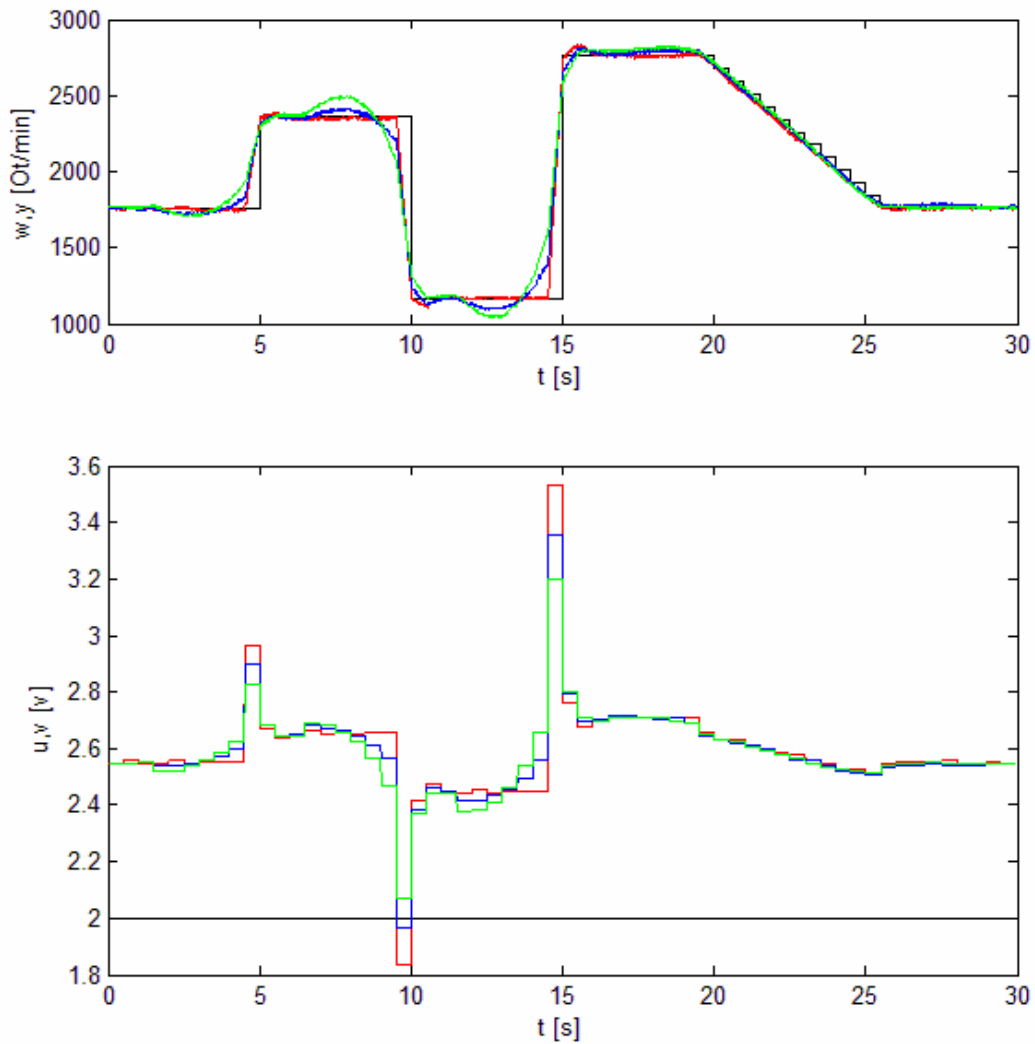
Obr. 18. Regulační pochod pro parametry  $N_2=3$ ,  $\lambda=0$  (červeně),  $\lambda=1$  (modře),  $\lambda=3$  (zeleně)

Na obr. 18 vidíme regulační pochod pro různá nastavení parametru  $\lambda$  a pro maximální horizont 3. Z obrázku je patrné, že je-li  $\lambda=0$ , dochází ke změnám akčního zásahu až poslední krok před změnou žádané veličiny. Je-li parametr  $\lambda=1$ , dochází ke změnám akčního zásahu již tři kroky před změnou žádané veličiny, čímž se snižuje velikost změny akčního zásahu v jednotlivých krocích i maximální velikost akčního zásahu nutného pro dosažení nové hodnoty žádané veličiny. Pro nastavení  $\lambda=3$  je efekt popsán výše ještě výrazněji.



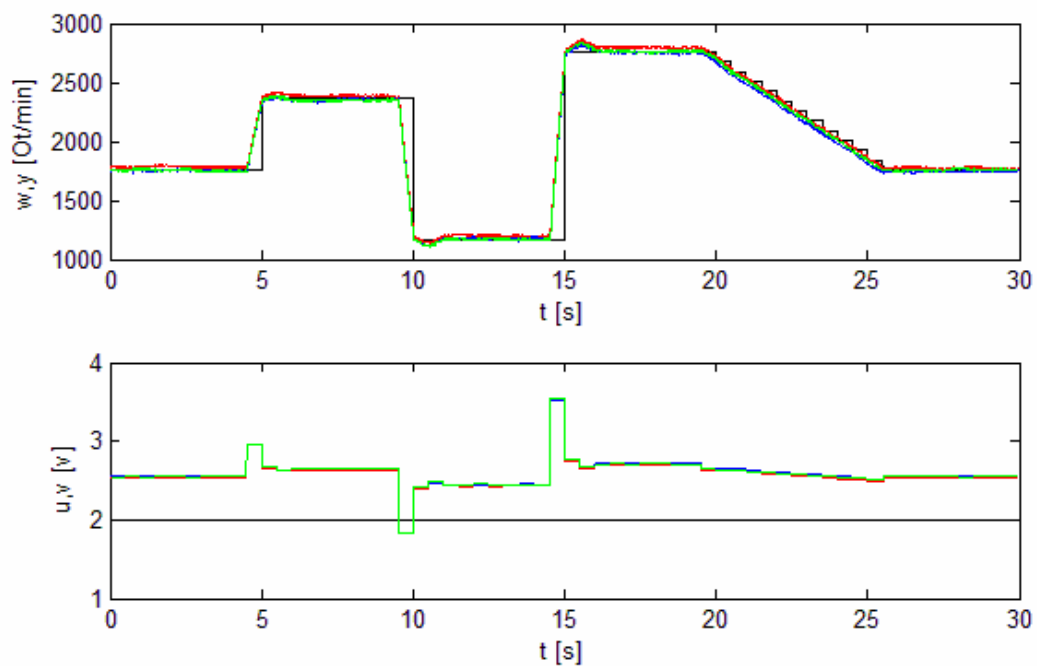
Obr. 19. Regulační pochod pro parametry  $N_2=5$ ,  $\lambda=0$  (červeně),  $\lambda=1$  (modře),  $\lambda=3$  (zeleně)

Z obr. 19 je patrné, že zvýšení maximálního horizontu na hodnotu 5 vede k tomu, že při nenulovém nastavení parametru  $\lambda$  dochází ke změnám akčního zásahu již 5 kroků před změnou žádané veličiny. Dochází tedy k ještě většímu snížení změn akčního zásahu  $\Delta u$  v jednotlivých krocích, než v předchozím případě.

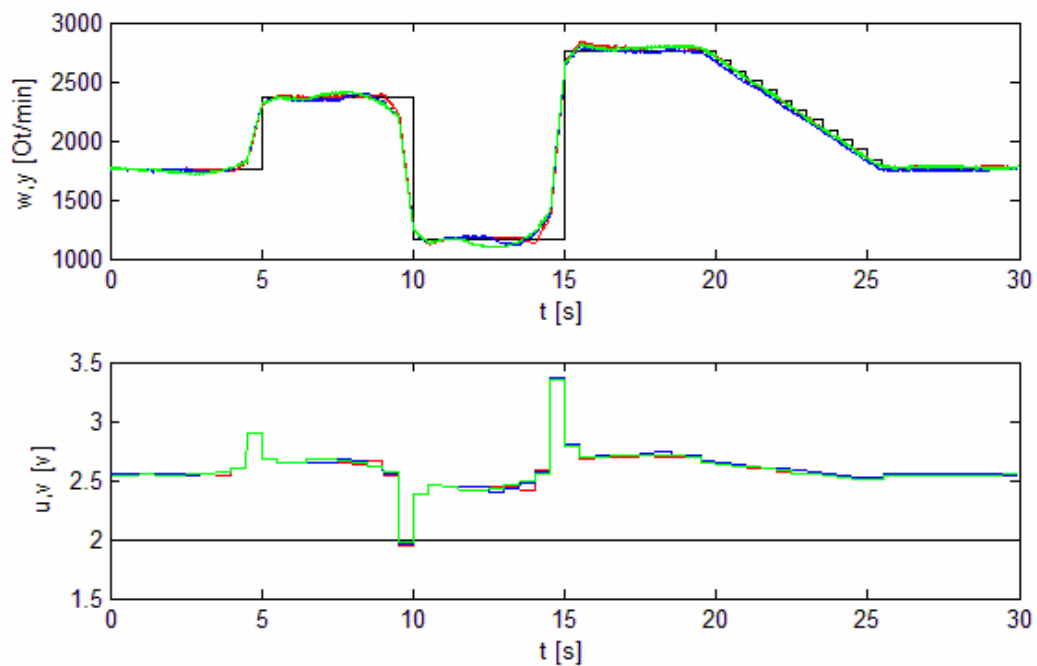


Obr. 20. Regulační pochod pro parametry  $N_2=7$ ,  $\lambda=0$  (červeně),  $\lambda=1$  (modře),  $\lambda=3$  (zeleně)

Z grafu na obr. 20 je zřejmé, že další zvýšení maximálního horizontu  $N_2=7$  vede opět k tomu, že regulátor na změnu žádané veličiny reaguje dříve. Typickým jevem pro MPC při dostatečně dlouhém horizontu je podkmit, který bylo částečně možné pozorovat již na obr. 19, ovšem zde je již zcela jasný. Vyšší hodnotou parametru  $\lambda$  tak dojde ke snížení změn akčního zásahu  $\Delta u$ , ovšem dojde také ke snížení kvality regulace.

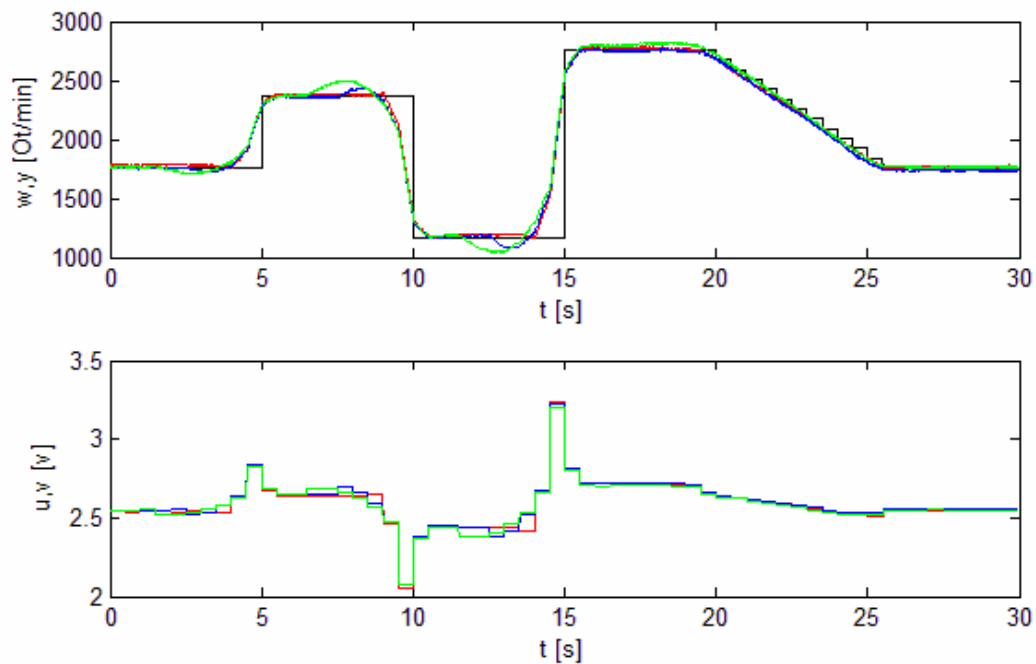


Obr. 21. Regulační pochod pro parametry  $\lambda = 0$   $N_2=3$  (červeně),  $N_2=5$  (modře),  $N_2=7$  (zeleně)



Obr. 22. Regulační pochod pro parametry  $\lambda = 1$   $N_2=3$  (červeně),  $N_2=5$  (modře),  $N_2=7$  (zeleně)





Obr. 23. Regulační pochod pro parametry  $\lambda=3$   $N_2=3$  (červeně),  $N_2=5$  (modře),  $N_2=7$  (zeleně)

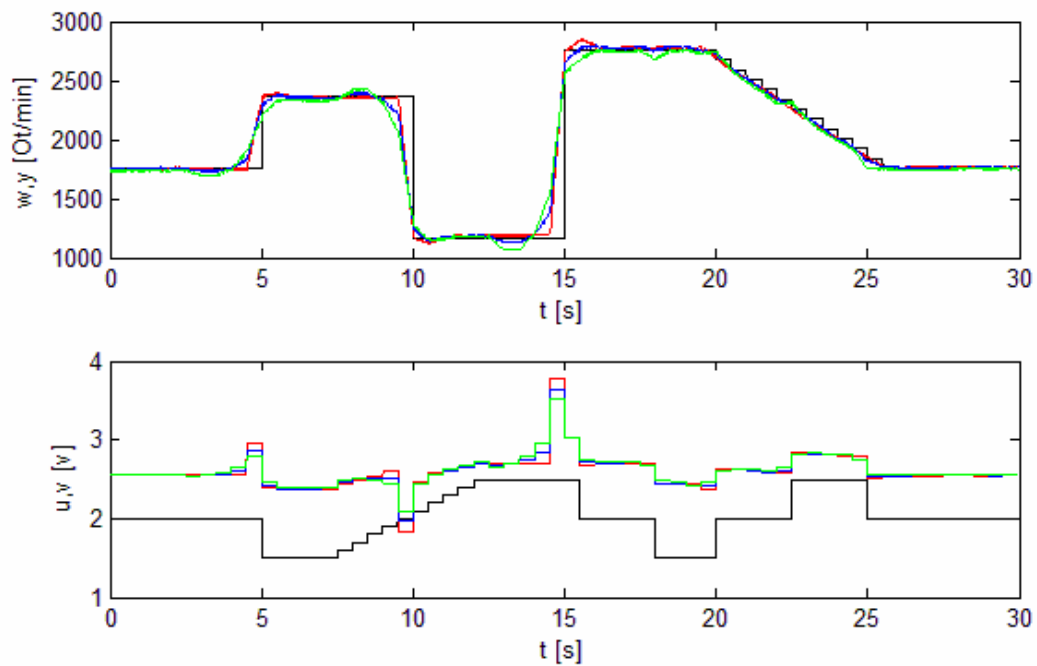
Na obr. 21 až 23 se nachází stejné průběhy jako na obr. 18 až 20, ale jsou seřazeny podle parametru  $\lambda$ .

Na obr. 21 je srovnání pro různé maximální řídicí horizonty  $N_2$ , při čemž  $\lambda=0$ . Zde vidíme, že zvýšení maximálního horizontu nemá při  $\lambda=0$ , tedy když se nevyužívá penalizace změn, žádný význam, Dochází totiž vždy k dosažení žádaného výstupu až posledním akčním zásahem před změnou žádané hodnoty.

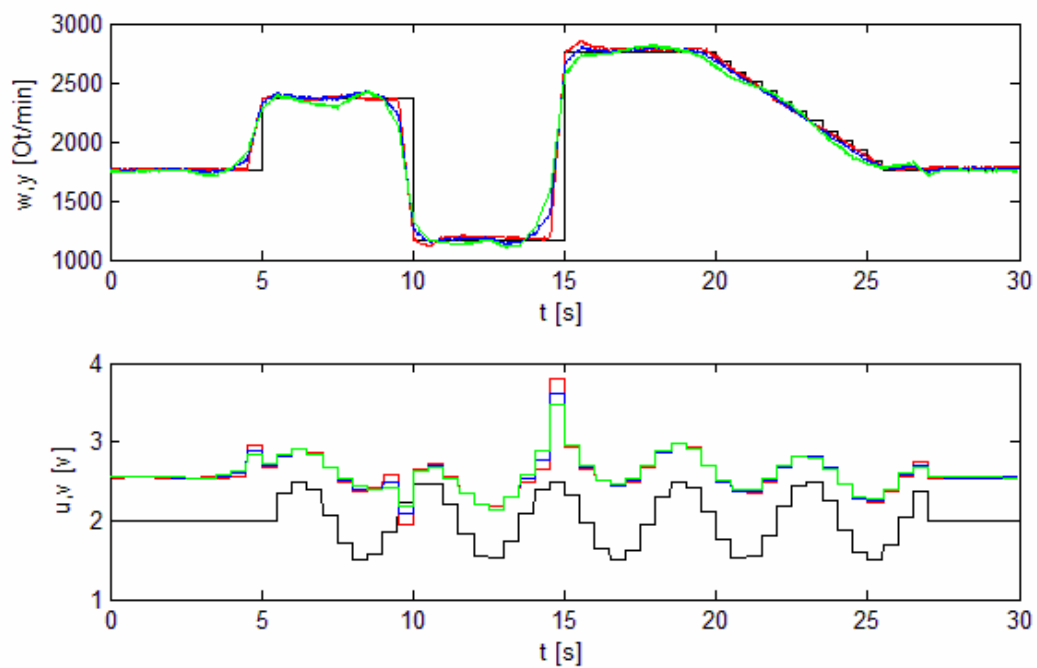
Na obr. 22 a obr. 23 je srovnání různých maximálních řídicí horizontů pro  $\lambda=1$  a  $\lambda=3$ . Zde je vidět, že ačkoliv dochází ke změnám akčního zásahu pro vyšší hodnoty  $N_2$  dříve, je poslední akční zásah před změnou žádané hodnoty, tedy největší akční zásah, stejný.

Je tedy jasné, že zatímco změna parametru  $\lambda$  ovlivní nejen velikost změn akčního zásahu  $\Delta u$  ale i maximální velikost akčního zásahu  $u$ , parametr  $N_2$  ovlivňuje pouze velikost změn akčního zásahu  $\Delta u$ .

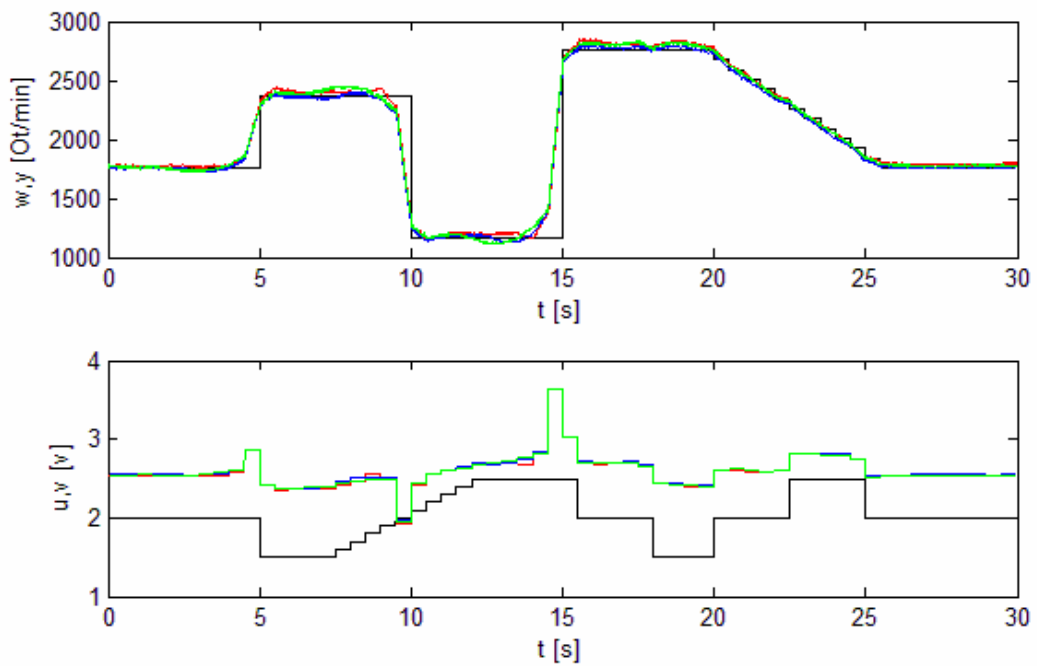
## 8.1 Vliv parametrů na potlačení poruchy



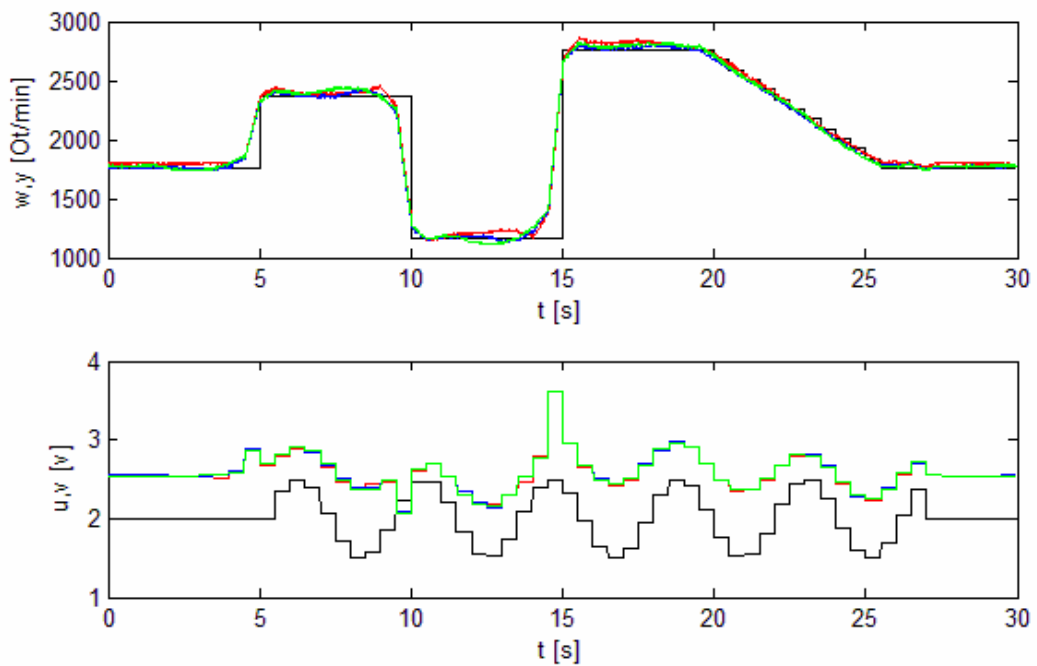
Obr. 24. Regulační pochod pro parametry  $N_2=5$ ,  $\lambda=0$  (červeně),  $\lambda=1$  (modře),  $\lambda=0$  (zeleně) s poruchou typu skok



Obr. 25. Regulační pochod pro parametry  $N_2=5$ ,  $\lambda=0$  (červeně),  $\lambda=1$  (modře),  $\lambda=0$  (zeleně) s poruchou typu funkce sinus



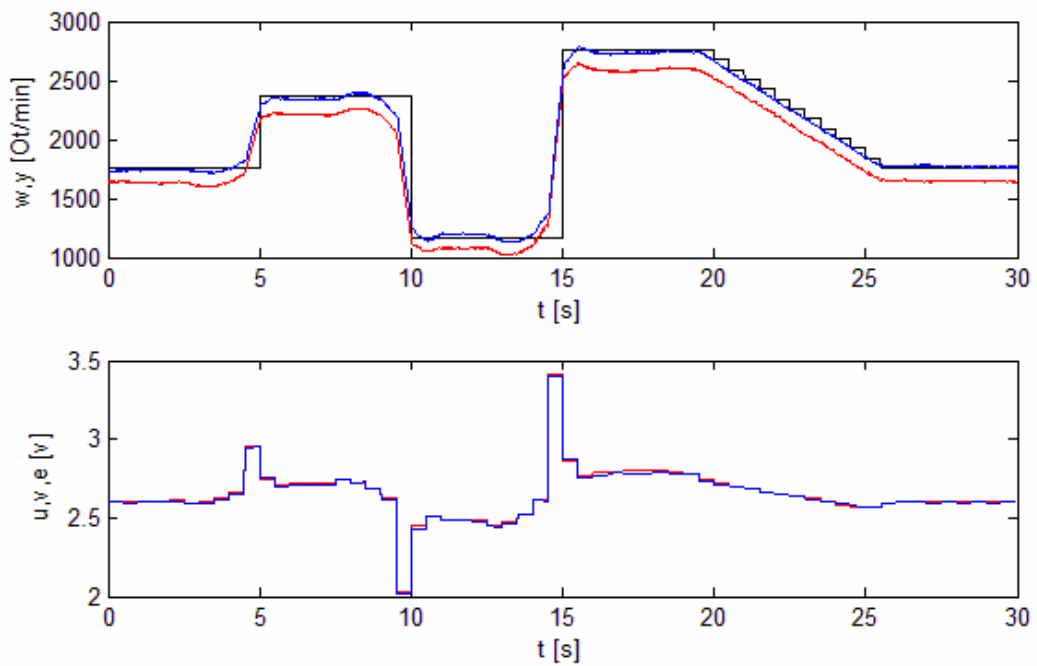
Obr. 26. Regulační pochod pro parametry  $\lambda = 1$ ,  $N_2=3$  (červeně),  $N_2=5$  (modře),  $N_2=7$  (zeleně) s poruchou typu skok



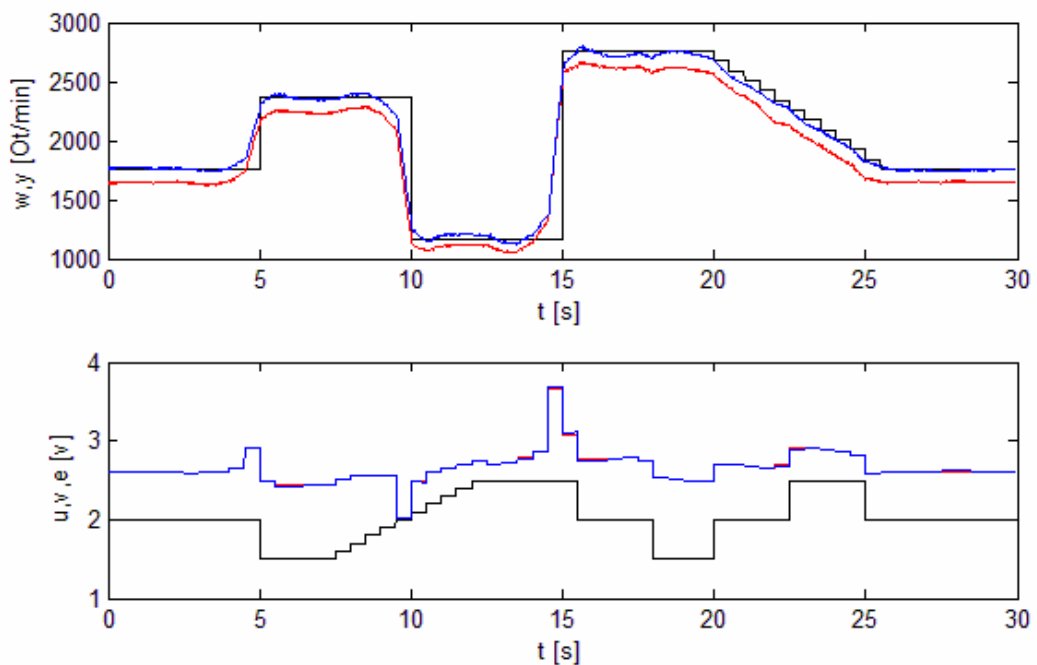
Obr. 27. Regulační pochod pro parametry  $\lambda = 1$ ,  $N_2=3$  (červeně),  $N_2=5$  (modře),  $N_2=7$  (zeleně) s poruchou typu funkce sinus

Z obr. 24 až 27 je patrné, že zvýšením penalizace změn akčního zásahu, tj. parametru  $\lambda$ , dojde ke snížení změn akčního zásahu  $\Delta u$ , ale také ke snížení schopnosti regulátoru potlačovat poruchu. Z grafů vyplývá, že chování regulátoru v závislosti na nastavených parametrech při potlačování změn poruchové veličiny je shodné s chováním regulátoru při sledování žádané veličiny.

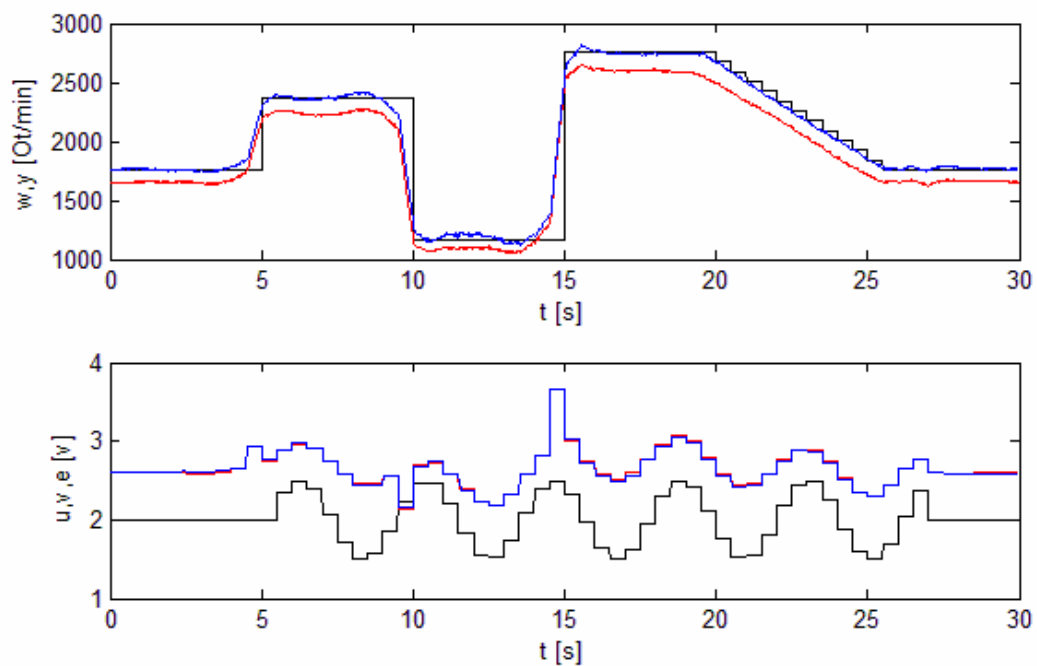




Obr. 29. Porovnání prediktivního regulátoru (červeně) a kombinace prediktivního regulátoru a PID regulátoru (modře).



Obr. 30. Porovnání prediktivního regulátoru (červeně) a kombinace prediktivního regulátoru a PID regulátoru (modře) při řízení s poruchou typu skok



Obr. 31. Porovnání prediktivního regulátoru (červeně) a kombinace prediktivního regulátoru a PID regulátoru (modře) při řízení s poruchou typu funkce sinus

Na obr. 29 až 31 vidíme, že zapojením PID regulátoru do regulačního obvodu byl odstraněn problém s nenulovou regulační odchylkou při nesprávně identifikovaném přenosu soustavy.

## ZÁVĚR

Náplní diplomové práce je identifikace a prediktivní řízení laboratorního servomechanismu AMIRA DR300. Tento model je tvořen dvěma motory. Jeden z motorů je zapojen jako generátor a slouží k vytvoření zátěže pro druhý motor, kdy měnící se zátěž je měřená poruchová veličina. Byl odvozen a poté realizován prediktivní regulátor s měřenou poruchovou veličinou. Regulátor byl realizován v programovém prostředí MATLAB/Simulink.

Byla ověřena schopnost regulátoru pracovat s podmínkou omezení akčního zásahu, přičemž bylo provedeno srovnání se spojitým PID regulátorem. Omezení akčního zásahu bylo voleno tak, aby část průběhu žádané veličiny ležela v oblasti otáček, jež nelze při tomto omezení dosáhnout, avšak část průběhu žádané veličiny ležela v dosažitelné oblasti. PID regulátor ve chvíli, kdy žádaná hodnota výstupní veličiny klesla do dosažitelné oblasti, měl na výstupu vlivem přesycení ještě cca 2 sec. Plný akční zásah a až poté pokračoval v regulaci. Prediktivní regulátor začal snižovat akční zásah okamžitě.

Průběh regulačního pochodu lze ovlivňovat mnoha parametry. Vliv penalizace akčního zásahu  $\lambda$  a vliv maximálního horizontu  $N_2$  byl zkoumán v kapitole 8.

Byla také ověřována robustnost tohoto prediktivního regulátoru, při čemž bylo zjištěno, že pokud není identifikace soustavy dostatečně přesná, není regulátor schopen dosáhnout nulové regulační odchylky. Zřejmě z tohoto důvodu se v praxi často prediktivní regulátory využívají v kombinaci s jednoduššími robustními regulátory. Proto byl vytvořen regulátor, který je kombinací prediktivního regulátoru a PID regulátoru, který reguluje odchylku mezi skutečnou hodnotou výstupní veličiny a hodnotou výstupní veličiny získanou výpočtem z přenosu soustavy, který používá prediktivní regulátor k predikci budoucích hodnot výstupní veličiny.



## ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

This Diploma Thesis deals with the identification and predictive control of a laboratory servomechanism model AMIRA DR300. This model contains two engines. One of them is used as a generator to create a load for the second engine. Changing the load is measured quantity. The predictive controller with measured disturbance signal was derived and then implemented in real time conditions. Controller was developed by Matlab / Simulink.

It was verified by the regulator's ability to work with the condition limits the output level, which was compared with a continuous PID controller. Limit for the intervention was chosen so that the desired quantity of lay in the speed at which this limit is not reached, but a part of the desired set point values lie in the feasible region. PID control when setpoint outputs declined to reach the area, had to exit due to the glut still about 2 seconds full control action and then to continue the regulation. Predictive controller to reduce the control action began immediately.

Process of the control procedure can be affected by many parameters. Influence of interference penalty action and influence of the maximum term  $N_2$  was studied in chap. 8.

It was also verified the robustness of the predictive controller, during which it was found that if the system is not sufficiently precise identification, the controller is able to reach zero control deviation. Probably for this reason are predictive controllers used in combination with simple robust controllers. Therefore, the regulator was created, which is a combination of predictive controller and PID controller, which regulates the deviation between the actual value of the output quantity and the value derived from the outputs of the transmission system that uses predictive controller to predict future values of output variables.

## LITERATURA

- [1] Cutler, C. R. and B. L. Ramaker, Dynamic Matrix Control. In: *Proc. Joint Automatic Control Conference*, volume 1, San Francisco, CA. Paper No. WP5-B, 1980.
- [2] Mikleš, J. and M. Fikar, *Process Modelling, Optimisation and Control*. Springer-Verlag, Berlin, 2008.
- [3] D. W. Clarke, D. W., C. Mohtadi, and P. S. Tuffs, Generalized predictive control. Part I. The basic algorithm, Generalized predictive control. Part II. Extensions and interpretations. *Automatica*, 23, 137-160, 1987.
- [4] Fikar, M. and S. Engell, Receding horizon predictive control based upon Youla-Kucera parametrisation. *European Journal of Control*, 3, 304–316, 1997.
- [5] Kwon, W. H. and S. Han, *Receding Horizon Control*. Springer-Verlag, London, 2005.
- [6] Bitmead, R. R., M. Gevers and V. Wertz, *Adaptive Optimal Control: The Thinking Man's GPC*. Prentice Hall, 1990.
- [7] Soeterboek, R. *Predictive Control-a Unified Approach*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New York, 1992.
- [8] Kwon, W. H., H. H. Choi, D. G. Byun and S. B. Noh, Recursive solution of generalized predictive control and its equivalence to receding horizon tracking control. *Automatica*, 28, 1235-1238, 1992.
- [9] Camacho, E. F. and C. Bordons, *Model Predictive Control*. Springer-Verlag, London, 2004.
- [10] P.P. Kanjilal, *Adaptive Prediction and Predictive Control*. Peter Peregrinus, U. K., 1995.
- [11] Sunan, H., T. K. Kiong and L. T. Heng, *Applied Predictive Control*. Springer-Verlag, London, 2002.
- [12] Maciejowski, J. M. *Predictive Control with Constraints*. Prentice Hall, Harlow, 2002.
- [13] Rossiter, J. A., *Model Based Predictive Control: A Practical Approach*. CRC Press, Boca Raton, Florida, 2003.
- [14] Bemporad, A., M. Morari, V. Dua, V. and E. N. Pistikopoulos, The explicit linear quadratic regulator for constrained systems, *Automatica*, 38, 2002, 3-20.
- [15] Grieder, P., M. Kvasnica, M. Baotic and M. Morari, Stabilizing low complexity feedback control of constrained piecewise affine systems. *Automatica*, 41, 1683–1694, 2005.
- [16] Kvasnica, M.: *Efficient Software Tools for Control and Analysis of Hybrid Systems*. ETH Zurich, Physikstrasse 3, 8092 Zurich, Switzerland, 2008.
- [17] Kvasnica, M., P. Grieder and M. Baotic, Multi-Parametric Toolbox (MPT), <http://control.ee.ethz.ch/~mpt/>, 2004.
- [18] Henson, M. A., Nonlinear model predictive control: current status and future directions. *Computers and Chemical Engineering*, 23, 1998, 187–202.
- [19] Aggelogiannaki E. and H. Sarimveis, Nonlinear model predictive control for distributed parameter systems using data driven artificial neural network models. *Computers & Chemical Engineering*, 32, 2008, 1225-1237.
- [20] Martínez, M., J. S. Senent and X. Blasco, Generalized predictive control using genetic algorithms (GAGPC). *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 11, 1998, 355-367.

- [21] Onnen C., R. Babuška, U. Kaymak, J. M. Sousa, H. B. Verbruggen and R., Genetic algorithms for optimization in predictive control. *Control Engineering Practice*, 5, 1997, 1363-1372.
- [22] Zelinka, I., Z. Oplatková, M. Šeda, P. Ošmera and F. Včelař, *Evolution of the Computer Technique – Principle and Application* (in Czech), BEN, Prague, 2008.
- [23] Murray-Smith, R. and T. A. Johansen, *Multiple Model Approaches to Modelling and Control*. Taylor and Francis, London, 1997.
- [24] Z.K. Xue, Z. K. and S.Y. Li, Multi-model modelling and predictive control based on local model networks. *Control and Intelligent Systems archive*, 34, 2006, 105 - 112.
- [25] M. Morari, M. and J. H. Lee, Model predictive control: past, present and future. *Computers and Chemical Engineering*, 23, 1999, 667-682.
- [26] Quin, S. J and T. A. Bandgwell, An overview of industrial model predictive control technology. In: *Proceedings of the Chemical Process Control – V.*, 93, *AICHE Symposium Series*. CACHE and AIChE. Tahoe City, CA, USA, 1996, 232-256.
- [27] Quin, S. J. and T. A. Bandgwell, An overview of nonlinear model predictive control applications. *Nonlinear Model Predictive Control* (F. Allgöwer & A. Zheng, Ed.), Birkhäuser Verlag, Basel – Boston – Berlin, 2000, 369-392.
- [28] S. J. Quin, S. J. and T. A. Bandgwell, A survey of industrial model predictive control technology. *Control Engineering Practice*, 11, 2003, 733-764.
- [29] Chalupa, P. and V. Bobál, Modelling and predictive control of inverted pendulum. In: *Proc. of the 22<sup>th</sup> European Conference on Modelling and Simulation*, Nicosia, Cyprus, 2008, 531-537.
- [30] Bobál, V., M. Kubalčík, P. Chalupa and P. Dostál, Adaptive predictive control of nonlinear system with constraint of manipulated variable. In: *Proc. of the 28<sup>th</sup> IASTED International Conference Modelling Identification and Control (MIC 2009)*, Innsbruck, Austria, 2009, 349-354.
- [31] Bobál, V., M. Kubalčík, P. Chalupa and P. Dostál, Self-tuning control of nonlinear servo system: comparison of LQ and predictive approach. In: *Proc. of the 17<sup>th</sup> Mediterranean Conference on Control and Automation MED'09*, Thessaloniki, Greece, 2009, 240-245.
- [32] Bobál, V., Chalupa, P., Kubalčík, M. and P. Dostál, Self-tuning Predictive Control of Nonlinear Servo-motor. *Journal of Electrical Engineering*, 61, 2010, 365- 372.
- [33] Kubalčík, M. and V. Bobál, Adaptive predictive control applied to coupled drives process. In: *Proc. of the 28<sup>th</sup> IASTED International Conference Modelling Identification and Control (MIC 2009)*, Innsbruck, Austria, 2009, 331-336.
- [34] Bobál, V., M. Kubalčík, P. Chalupa and P. Dostál, Self-tuning predictive control of through-flow heat exchanger. In: *Proc. of the 36<sup>th</sup> International Conference of Slovak Society of Chemical Engineering*, Tatranské Matliare, Slovakia, 2009, 089-1 - 089-10.
- [35] Zhaoa, F., Y. P. Gupta, A simplified predictive control algorithm for disturbance rejection. In: *The Instrumentation, Systems, and Automation Society*, Volume 44, Issue 2, April 2005, P. 187-198
- [36] Jiguang, Z., Shi Ren, Linan, M., Mengxiao. W, Disturbance Rejection Performance of Generalized Predictive Control. In: *Intelligent Control and Automation*, 2002, Proceedings of the 4th World Congress on, P. 295 - 299

- [37] Rossiter, J.A. Chisci, L. Disturbance rejection in constrained predictive control. In: *Control '98. UKACC International Conference on* (Conf. Publ. No. 455), Sep 1998
- [38] Jun Yang, Shihua Li, Xisong Chen and Qi Li, Disturbance rejection of dead-time processes using disturbance observer and model predictive control. In: *Chemical Engineering Research and Design*, Volume 89, Issue 2, February 2011, P. 125-135
- [39] Manzie, C., H. C. Watson, A novel approach to disturbance rejection in idle speed control towards reduced idle fuel consumption. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2003
- [40] Bobál, V. *Adaptivní a prediktivní řízení*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Akademické centrum 2009, ISBN 978-80-7318-662-3

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

|             |  |
|-------------|--|
| $A(z^{-1})$ | polynom jmenovatele $Z$ - přenosu soustavy                                   |
| $a_1$       | koeficient jmenovatele $Z$ - přenosu soustavy                                |
| $B(z^{-1})$ | polynom čitatele $Z$ - přenosu soustavy                                      |
| $b_{u1}$    | koeficient čitatele $Z$ - přenosu soustavy                                   |
| $b_{v1}$    | koeficient čitatele $Z$ - přenosu poruchy                                    |
| $C(z^{-1})$ | polynom čitatele $Z$ - přenosu poruchy                                       |
| $E$         | polynom regulačních odchylek   |
| $e_{m-n}$   | odchylka mezi naměřenou výstupní veličinou a modelovanou výstupní veličinou  |
| $F$         | matice pro výpočet nucené odezvy   |
| $R$         | matice pro výpočet $\Delta u$  |
| $T_w$       | časová konstanta reg. pochodu při návrhu regulátoru metodou inverze dynamiky |
| $u$         | akční zásah  |
| $u_p$       | pracovní bod akčního zásahu  |
| $u_f$       | nucená část akčního zásahu   |
| $y$         | výstupní veličina  |
| $y_f$       | část výstupní veličiny nucená akčním zásahem                                 |
| $y_0$       | část výstupní veličiny daná pouze předchozími hodnotami a akčními zásahy     |
| $y_m$       | modelovaná výstupní veličina   |
| $y_n$       | naměřená výstupní veličina   |
| $\lambda$   | parametr penalizace změn akčního zásahu                                      |
| $N_1$       | minimální horizont   |
| $N_2$       | maximální horizont   |

---

|       |                      |
|-------|----------------------|
| $N_u$ | řídící horizont      |
| $v$   | porucha              |
| $v_p$ | pracovní bod poruchy |
| $w$   | žádaná veličina      |

## SEZNAM OBRÁZKŮ

|  |    |
|--|----|
| <i>Obr. 1. Princip prediktivního řízení s modelem .....</i>  | 13 |
| <i>Obr. 2. Minimální, Maximální a Řídicí horizont .....</i>  | 14 |
| <i>Obr. 3. Porovnání volné odezvy (modrá), nucené odezvy (zelená) .....</i>  | 15 |
| <i>Obr. 4. Srovnání hodnot získaných simulací a hodnot vypočtených prediktorem.....</i>  | 19 |
| <i>Obr. 5. Servomechanismus AMIRA DR300 .....</i>  | 23 |
| <i>Obr. 6. Statická charakteristika .....</i>  | 24 |
| <i>Obr. 7. Simulační schéma pro získání experimentálních dat .....</i>   | 25 |
| <i>Obr. 8. Porovnání naměřených dat a identifikovaného přenosu soustavy .....</i>  | 26 |
| <i>Obr. 9. Simulační schéma zapojení regulátoru .....</i>  | 27 |
| <i>Obr. 10. Simulační schéma vnitřní struktury subsystému regulátoru .....</i>   | 27 |
| <i>Obr. 11. Porovnání pred. reg. s měřenou poruchou (červeně), pred. reg. bez měřené poruchy (modře) a spojitého PID regulátoru (zeleně) pro regulační pochod neobsahující změny poruchové veličiny (černě), žádaná hodnota (černě) .....</i>        | 30 |
| <i>Obr. 12. Porovnání pred. reg. s měřenou poruchou (červeně), pred. reg. bez měřené poruchy (modře) a spojitého PID regulátoru (zeleně) pro regulační pochod s poruchovou veličinou (černě) ve tvaru skoku, žádaná hodnota (černě).....</i>         | 30 |
| <i>Obr. 13. Porovnání pred. reg. s měřenou poruchou (červeně), pred. reg. bez měřené poruchy (modře) a spojitého PID regulátoru (zeleně) pro regulační pochod s poruchovou veličinou (černě) ve tvaru funkce sinus, žádaná hodnota (černě) .....</i> | 31 |
| <i>Obr. 14. Simulační schéma zapojení PID regulátoru s omezením akčního zásahu .....</i>   | 32 |
| <i>Obr. 15. Porovnání regulačního průběhu s omezením akčního zásahu, PID – modře, prediktivní regulátor - červeně.....</i>   | 32 |
| <i>Obr. 16. Robustnost prediktivního regulátoru. Regulátor vypočítaný ze správného přenosu(modře), regulátor vypočítaný ze zesíleného přenosu(červeně).....</i>  | 34 |
| <i>Obr. 17. Robustnost PID regulátoru. Regulátor vypočítaný ze správného přenosu(modře), regulátor vypočítaný ze zesíleného přenosu(červeně).....</i>  | 35 |
| <i>Obr. 18. Regulační pochod pro parametry <math>N_2=3</math>, <math>\lambda=0</math> (červeně), <math>\lambda=1</math> (modře), <math>\lambda=3</math> (zeleně).....</i>  | 37 |
| <i>Obr. 19. Regulační pochod pro parametry <math>N_2=5</math>, <math>\lambda=0</math> (červeně), <math>\lambda=1</math> (modře), <math>\lambda=3</math> (zeleně).....</i>  | 38 |

|   |    |
|---|----|
| <i>Obr. 20. Regulační pochod pro parametry <math>N_2=7</math>, <math>\lambda=0</math> (červeně), <math>\lambda=1</math> (modře),<br/><math>\lambda=3</math> (zeleně).....</i>                               | 39 |
| <i>Obr. 21. Regulační pochod pro parametry <math>\lambda=0</math> <math>N_2=3</math> (červeně), <math>N_2=5</math> (modře),<br/><math>N_2=7</math> (zeleně).....</i>  | 40 |
| <i>Obr. 22. Regulační pochod pro parametry <math>\lambda=1</math> <math>N_2=3</math> (červeně), <math>N_2=5</math> (modře),<br/><math>N_2=7</math> (zeleně).....</i>  | 40 |
| <i>Obr. 23. Regulační pochod pro parametry <math>\lambda=3</math> <math>N_2=3</math> (červeně), <math>N_2=5</math> (modře),<br/><math>N_2=7</math> (zeleně).....</i>  | 41 |
| <i>Obr. 24. Regulační pochod pro parametry <math>N_2=5</math>, <math>\lambda=0</math> (červeně), <math>\lambda=1</math> (modře),<br/><math>\lambda=0</math> (zeleně) s poruchou typu skok .....</i>         | 42 |
| <i>Obr. 25. Regulační pochod pro parametry <math>N_2=5</math>, <math>\lambda=0</math> (červeně), <math>\lambda=1</math> (modře),<br/><math>\lambda=0</math> (zeleně) s poruchou typu funkce sinus .....</i> | 42 |
| <i>Obr. 26. Regulační pochod pro parametry <math>\lambda=1</math>, <math>N_2=3</math> (červeně), <math>N_2=5</math> (modře),<br/><math>N_2=7</math> (zeleně) s poruchou typu skok.....</i>                  | 43 |
| <i>Obr. 27. Regulační pochod pro parametry <math>\lambda=1</math> <math>N_2=3</math> (červeně), <math>N_2=5</math> (modře),<br/><math>N_2=7</math> (zeleně) s poruchou typu funkce sinus .....</i>          | 43 |
| <i>Obr. 28. Simulační schéma kombinace prediktivního regulátoru a PID regulátoru .....</i>  | 45 |
| <i>Obr. 29. Porovnání prediktivního regulátoru (červeně) a kombinace prediktivního<br/>regulátoru a PID regulátoru (modře) .....</i>  | 46 |
| <i>Obr. 30. Porovnání prediktivního regulátoru (červeně) a kombinace prediktivního<br/>regulátoru a PID regulátoru (modře) při řízení s poruchou typu skok .....</i>  | 46 |
| <i>Obr. 31. Porovnání prediktivního regulátoru (červeně) a kombinace prediktivního<br/>regulátoru a PID regulátoru (modře) při řízení s poruchou typu funkce sinus .....</i>                                | 47 |



**SEZNAM TABULEK**

|  |    |
|--|----|
| Tab.1 Průběhy $u$ , $v$ .....                    | 19 |
| Tab. 2 Kombinace vstupní veličiny a poruchy..... | 24 |

## SEZNAM PŘÍLOH

CD-ROM