

# Využití metod prediktivního řízení pro řízení laboratorního modelu

Bc. Jolana Pacíková

---

Diplomová práce  
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jolana Pacíková**  
Osobní číslo: **A14398**  
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**  
Studijní obor: **Automatické řízení a informatika**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Využití metod prediktivního řízení pro řízení laboratorního modelu**

Téma anglicky: **Utilization of Predictive Control Methods for Control of Laboratory Model**

Zásady pro vypracování:

1. Na základě matematicko-fyzikální analýzy sestavte matematický model soustavy spojených nádrží a nasimulujte základní charakteristiky.
2. Analyzujte statické a dynamické vlastnosti reálného řízeného systému spojených nádrží.
3. Zvolte vhodný vstupně-výstupní model řízeného systému a navrhnete prediktivní regulátor.
4. Vytvořte základní simulinkové schéma regulačního obvodu s prediktivním regulátorem. Regulátor realizujte jako S-funkci.
5. Vytvořený regulátor ověřte simulačně a implementujte pro řízení na reálné soustavě. Regulátor realizujte jak s pevně nastavenými parametry, tak jako samočinně se nastavující.
6. Porovnejte výsledky regulačních pochodů dosažených se samočinně se nastavujícím regulátorem a s regulátorem s pevně nastavenými parametry.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. ROSSITER, J.A. **Model-Based Predictive Control**. 1. London: CRC Press, 2003. ISBN 0-8493-1291-4.
2. CAMACHO, E.F. a C. BORDONS. **Model Predictive Control**. 2. London: Springer-Verlag, 2004. ISBN 1-85233-694-3.
3. MIKLEŠ, Ján a Miroslav FIKAR. **Modelovanie, identifikácia a riadenie procesov II: Identifikácia a optimálne riadenie**. Bratislava: STU, Bratislava, Vazovova 5, 2004.
4. CHALUPA, Petr, Jakub NOVÁK a Vladimír BOBÁL. **Comprehensive model of DTS200 three tank system in Simulink**. *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences* [online]. 2012, vol. 6, iss. 2, s. 358-365. [cit. 2016-02-01]. ISSN 1998-0140.
5. BOBÁL, Vladimír. **Adaptivní a prediktivní řízení**. 1. vydání. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007. ISBN 978-80-7318-662-3.

Vedoucí diplomové práce:

**doc. Ing. Marek Kubalčík, Ph.D.**

Ústav řízení procesů

Datum zadání diplomové práce:

**19. února 2016**

Termín odevzdání diplomové práce:

**25. května 2016**

Ve Zlíně dne 19. února 2016



doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.  
*děkan*



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
*ředitel ústavu*


## **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 připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- 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/bakalářské 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, dne 24. 5. 2016

  
.....  
podpis diplomanta

## **ABSTRAKT**

Práce se zabývá aplikací prediktivního řízení na řízení modelu spojených nádrží DTS 200. Model se skládá ze tří nádrží, které jsou navzájem propojeny ventily. Voda do nádrží se napouští pomocí dvou čerpadel, které jsou připojeny na první a poslední nádrž. Práce řeší řízení výšky hladin dvou vnějších nádrží. Jedná se o nelineární soustavu se dvěma vstupy a dvěma výstupy. Je řešeno jak řízení s pevně nastavenými parametry, tak řízení systému s průběžnou identifikací modelu řízeného systému v reálném čase.

Klíčová slova: prediktivní řízení, model DTS 200, Simulink, identifikace

## **ABSTRACT**

The thesis deals with application of predictive control for control of a model of interconnected tanks DTS 200. The model consists of three tanks interconnected by valves. The water which is collected in a reservoir is pumped by two identical pumps which are connected to the outer tanks. The task is the control of levels of the outer tanks. The model is a non-linear system with two inputs and two outputs. The control algorithm was designed both with fixed parameters and with recursive identification of the model of the controlled process.

Keywords: Predictive control, DTS200 model, Simulink, identification

Poděkování věnuji vedoucímu mé diplomové práce, panu doc. Ing. Marku Kubalčíku, Ph.D., za účinnou metodiku, vstřícnost a ochotu poradit při vzniklých potížích, za rychlé reakce na mé dotazy a poskytnutí literárních zdrojů, které byly pro práci využity.

Rovněž mé poděkování patří panu Ing. Petru Chalupovi, Ph.D. a panu Ing. Jakubu Novákovi, Ph.D. za rychlé řešení při vyvstalých technických potížích na reálné soustavě.

V neposlední řadě poděkuji mé rodině a přátelům, kteří mne podporovali po dobu plnění této práce, ale i po celé studium.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 POPIS ŘÍZENÉHO MODELU SPOJENÝCH NÁDRŽÍ</b> .....	<b>12</b>
1.1 PROPOJENÍ MODELU .....	13
1.2 TECHNICKÉ PARAMETRY MODELU .....	14
1.3 ZVOLENÁ KONFIGURACE .....	15
<b>2 MODELOVÁNÍ A IDENTIFIKACE</b> .....	<b>16</b>
2.1 MATEMATICKÝ MODEL .....	17
2.2 KLASIFIKACE IDENTIFIKAČNÍCH METOD .....	18
2.3 METODA NEJMENŠÍCH ČTVERCŮ.....	19
2.4 REKURZIVNÍ METODA NEJMENŠÍCH ČTVERCŮ.....	21
<b>3 ZÁKLADNÍ POPIS A PRINCIP PREDIKTIVNÍHO ŘÍZENÍ</b> .....	<b>24</b>
3.1 VÝVOJ A POPIS PREDIKTIVNÍHO ŘÍZENÍ .....	24
3.2 PRINCIP PREDIKTIVNÍHO ŘÍZENÍ.....	25
3.3 MODELÝ PROCESŮ.....	26
3.4 ÚČELOVÁ FUNKCE.....	28
3.5 OMEZENÍ .....	29
3.5.1 Tvrdá omezení.....	30
3.5.2 Měkká omezení .....	31
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>32</b>
<b>4 MATEMATICKÝ MODEL</b> .....	<b>33</b>
<b>5 SIMULACE</b> .....	<b>36</b>
5.1 SIMULAČNÍ MODEL JAKO S-FUNKCE .....	36
5.2 STATICKÉ A DYNAMICKÉ VLASTNOSTI.....	37
5.2.1 Statická charakteristika modelu .....	37
5.2.2 Identifikace systému.....	39
5.3 NÁVRH A IMPLEMENTACE PREDIKTIVNÍHO REGULÁTORU.....	40
5.3.1 Výpočet predikcí .....	40
5.3.2 Stanovení omezení .....	42
5.3.3 Implementace regulátoru.....	43
5.4 SIMULACE REGULAČNÍHO POCHODU S PEVNĚ NASTAVENÝMI PARAMETRY .....	43
5.5 SIMULACE REGULAČNÍHO POCHODU S PRŮBĚŽNOU IDENTIFIKACÍ.....	45
<b>6 ŘÍZENÍ REÁLNÉ SOUSTAVY</b> .....	<b>48</b>
6.1 KALIBRACE MĚŘÍCÍ SOUSTAVY.....	48
6.2 STATICKÉ A DYNAMICKÉ VLASTNOSTI SOUSTAVY.....	49
6.2.1 Statická charakteristika .....	49
6.2.2 Identifikace soustavy.....	53
6.3 REGULACE S PEVNĚ NASTAVENÝMI PARAMETRY .....	54
6.3.1 Zanesení poruchové veličiny do regulace.....	56

6.4	REGULACE S PRŮBĚŽNOU IDENTIFIKACÍ .....	57
6.4.1	Zanesení poruchové veličiny do regulačního pochodu .....	59
<b>7</b>	<b>SROVNÁNÍ REGULAČNÍCH POCHODŮ .....</b>	<b>62</b>
7.1	REGULACE NA REÁLNÉM MODELU .....	62
7.2	SIMULACE REGULAČNÍCH POCHODŮ .....	63
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>65</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>67</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>69</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>70</b>
	<b>SEZNAM GRAFŮ .....</b>	<b>71</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>73</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>74</b>

## ÚVOD

Snahou posledních let je osvobodit člověka od jednotvárných, fyzicky náročných či dokonce i nebezpečných činností. Tento trend vedl k velkému rozvoji oblasti automatizace, která může různé činnosti nejen v technologickém procesu usnadnit, zjednodušit a zefektivnit. Cílem automatizace je potlačení nebo úplné odstranění vlivu lidského faktoru na výrobní či jiný technický objekt za použití samočinných řídicích systémů. Jejich výhodou je především přesný a včasný zásah do systému, který se může pohybovat řádově v milisekundách, a kterého by člověk nebyl schopen. [1]

Základní stavební prvek automatizace je řízení. Teorie řízení, jejíž vývoj zaznamenáváme ke konci 19. století, je založena na vnějším popisu systémů. Tento rozvoj šel kupředu hlavně díky neustále se rozvíjející výpočetní technice, která je v celém odvětví nepostradatelná. [1]

Složitější výpočty začaly počítače řešit až s rozmachem číslicové techniky. Algoritmy pro řízený byly do té doby odvozovány pouze pro spojité systémy a s tímto vývojem se začaly postupně odvozovat i algoritmy pro modely diskrétní, z čehož vyplynula možnost předpovědi budoucích hodnot výstupu daného procesu. Tato skutečnost je označována jako předchůdce prediktivního řízení. [3]

Prediktivní řízení založené na modelu řízeného systému, tzn. MPC (Model Predictive Control) vznikl v pozdních 70. letech a od té doby zaznamenal značný pokrok. Většina řídicích zákonů totiž explicitně nezvažuje budoucí následky a do jisté míry tvoří pouze očekávanou dynamiku uzavřené regulační smyčky. MPC ale výslovně vypočítává předpokládané chování po určité trajektorii a tím lze do jisté míry zabránit problémům, které mohou v budoucnosti nastat. [3]

Prediktivní řízení je nejen vhodné pro aplikaci do průmyslové praxe, ale lze se s ním setkat i v každodenním životě. Člověk jdoucí po chodníku si například predikuje stav vozovky svým pohledem, aby věděl, kdy je vhodné ji přejít na druhou stranu. V momentě, kdy dle svých predikcí zaznamená změnu dostatečně v předstihu, v tomto případě jedoucí automobil, změní svou trajektorii a setrvá na chodníku, než automobil přejede a silnice bude schůdná. Tak stejně predikuje i řidič řídicí automobil. Svým pohledem zjišťuje stav vozovky až do toho místa, kam dohlédne. Tím lze dříve zareagovat na nenadálou vzniklou situaci a tím také může zabránit kolizím, k nimž by došlo, kdyby sledoval pouze tu část vozovky, ve které se automobil zrovna nachází. [5]

Tato diplomová práce se zabývá zmiňovanou metodou prediktivního řízení systému se dvěma vstupy a dvěma výstupy. Tento systém bude reprezentován modelem tří propojených nádrží na kapalinu. V první fázi práce je zpracován matematický model zvoleného systému, který je následně využit pro sestavení simulačního schématu. To je využito v další části práce, ve které jsou nasimulovány vlastnosti systému a jeho chování při regulačním pochodu. V této části je také odvozen prediktivní regulátor, který je využíván právě na řízení simulační soustavy, ale i samotného reálného objektu. V poslední části jsou pak prezentovány výsledky řízení reálného systému.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 POPIS ŘÍZENÉHO MODELU SPOJENÝCH NÁDRŽÍ

Laboratorní model DTS200 sestavený firmou Amira se skládá ze tří válcových zásobníků na kapalinu, které jsou navzájem propojeny regulačními ventily (viz. Obrázek 1). Každý zásobník má navíc další regulační ventil, který odvádí kapalinu pryč ze systému. Na první a poslední nádrž je připojeno vždy jedno čerpadlo. Akumulační nádoba, umístěná pod nádržemi, slouží jako zásobárna kapaliny – v tomto případě je zde napuštěna voda. Do této nádoby jsou vyvedeny regulační ventily, které odvádí vodu ze zásobníků a také jsou zde připojena čerpadla, která naopak vodu do systému opět vrací.

Vzhledem k tomu, že průtok přes jednotlivé ventily závisí na druhé odmocnině výšky hladiny, jedná se o nelineární soustavu.



Obrázek 1 – Model spojených nádrží DTS 200

Součástí samotnému modelu jsou ještě dva ovládací bloky. Na prvním bloku lze přepínat mezi manuálním a automatickým napouštěním čerpadel, přičemž aktuální hodnota manuálního ovládání čerpadel je nastavována pomocí potenciometrů. Po přepnutí na automatické řízení lze výkon čerpadel ovládat pomocí počítače. Mimo ovládání se zde nachází i prvky signalizující chyby modelu. Na druhém bloku lze pomocí jednotlivých přepínačů ovládat otevírání a zavírání každého regulačního ventilu. Pokud jsou nastaveny

hraniční případy pro ventily, tedy buď zcela otevřen, nebo zcela zavřen, signalizuje to odpovídající LED dioda.

Díky tomu, že soustava obsahuje až 8 akčních zásahů (2 čerpadla a 6 ventilů) a až 3 regulované veličiny (výška hladin v jednotlivých nádržích), umožňuje tak velké množství konfigurací. [6]

## 1.1 Propojení modelu

Model je propojen s počítačem pomocí multifunkční měřicí karty, která je pak dále přes svorkovnici propojena s jednotlivými vstupy a výstupy samotného modelu. Počítačové ovládání modelu je prováděno pomocí programu Matlab, Simulink.

Čerpadla jsou řízena analogovými signály v rozsahu -10V až 10V a výška hladiny v jednotlivých nádržích se měří pomocí tlakových senzorů. [4]

Každý ventil je ovládán dvěma digitálními signály, přičemž první signál slouží ke spuštění zavírání ventilu a druhý naopak ventil začne otevírat. V momentě, kdy není ani jeden tento signál aktivován, zůstávají ventily v aktuální poloze. Ventil také poskytuje tři výstupní signály – analogový signál nesoucí informaci o napětí, které odpovídá geografické poloze ventilu a dva informativní logické signály, které uvádí, zda je ventil zcela otevřen či uzavřen. [5]

Celkový počet vstupů do laboratorního modelu DTS200 je 14. [5]

- 2 analogové signály sloužící pro ovládání jednotlivých čerpadel
- 12 digitálních signálů, pomocí kterých jsou ventily otevírány nebo zavírány (2 pro jeden ze 6 ventilů)

System obsahuje celkem 21 měřitelných výstupů, které mohou být použity jako kontrolní zpětné vazby nebo využity pro měření modelových charakteristik.

- 3 analogové signály představující výšky hladiny v zásobnících
- 6 analogových signálů reprezentující aktuální polohu ventilu
- 12 logických signálů s informací, zda jsou odpovídající ventily plně otevřeny či uzavřeny

## 1.2 Technické parametry modelu

Z manuálu o modelu DTS200 byly vypsány základní technické parametry soustavy do níže uvedených tabulek. Některé parametry soustavy budou využity pro práci se simulačním modelem v praktické části této práce. [4]

Tabulka 1 – Celkové parametry modelu [4]

Parametry soustavy	Hodnota	Jednotka
Délka	1300	mm
Šířka	360	mm
Výška	880	mm
Hmotnost	40	kg

Tabulka 2 – Rozměry jednotlivých zásobníků [4]

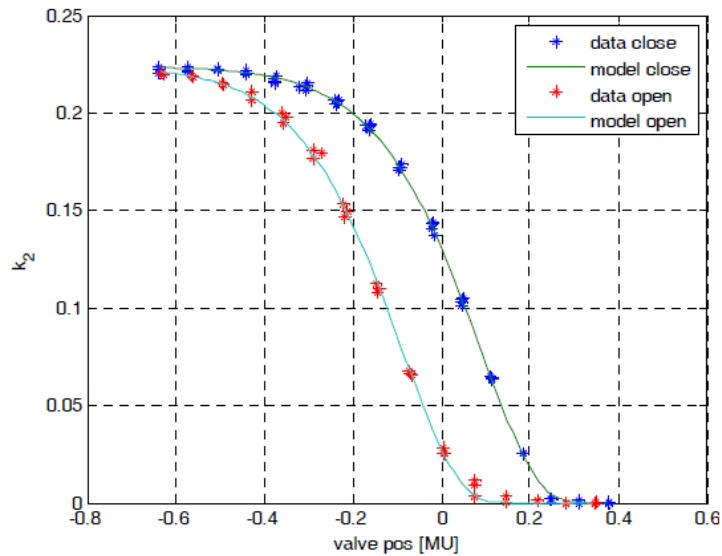
Rozměry zásobníků	Hodnota	Jednotka
Vnější průměr	150	mm
Vnitřní průměr	140	mm
Průměr kanálku	25	mm
Výška zásobníku	720	mm
Maximální výška hladiny	630	mm
Objem zásobníku	9	l

Tabulka 3 – Parametry čerpadel s DC motorem [4]

Čerpadla	Hodnota	Jednotka
Napětí	12	V
Maximální proud	4,5	A
Průtok	7	l
Tlak	1,4	bar
Hmotnost	1,5	kg
Délka	210	mm
Šířka	128	mm
Výška	115	mm

Dle zdroje [5], ve kterém byly experimentálně proměřovány regulační ventily, bylo zjištěno, že hysterezní křivka je pro každý ventil jiná. Dokonce se mohou lišit i hodnoty propouštění při otevírání a zavírání jednoho ventilu. Samotná hodnota o poloze ventilu navíc neposkytuje dostatek informací na určení aktuálního parametru ventilu  $k$ . Při experimentech bylo zjištěno, že například pro propouštěcí ventil z druhé do třetí nádrže, jehož poloha je 0 MU, může být hodnota parametru  $k_2$  kdekoli v rozmezí hodnot 0,03 až

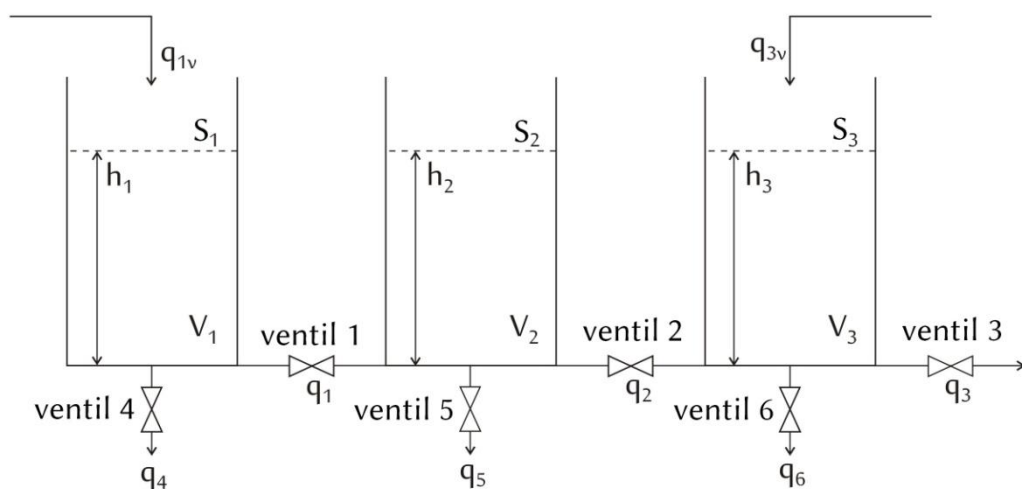
0,13. Pokud by s touto skutečností nebylo počítáno při využití ventilů jako akčního zásahu, může se stát řízení systému snadno nestabilní.



Graf 1 – model parametru  $k_2$  pro propouštěcí ventil mezi druhou a třetí nádrží [5]

### 1.3 Zvolená konfigurace

Pro práci byla zvolena varianta se dvěma vstupy a dvěma výstupy, tzn. řízení výšky hladiny ve dvou krajních nádržích pomocí připojených čerpadel. Při měření jsou navíc plně otevřeny regulační ventily propojující jednotlivé nádrže (tj. ventily 1 a 2). Tyto ventily nám zajišťují ovlivnění nádrží navzájem. Aby voda mohla z nádrží i odtékat, jsou naplno otevřeny i ventily, které vypouští kapalinu z krajních zásobníků (tj. 4 a 6). Zbylé dva ventily jsou zcela uzavřeny. Celkové schéma modelu lze vidět na Obrázku 2.



Obrázek 2 – Celkové schéma modelu spojených nádrží

## 2 MODELOVÁNÍ A IDENTIFIKACE

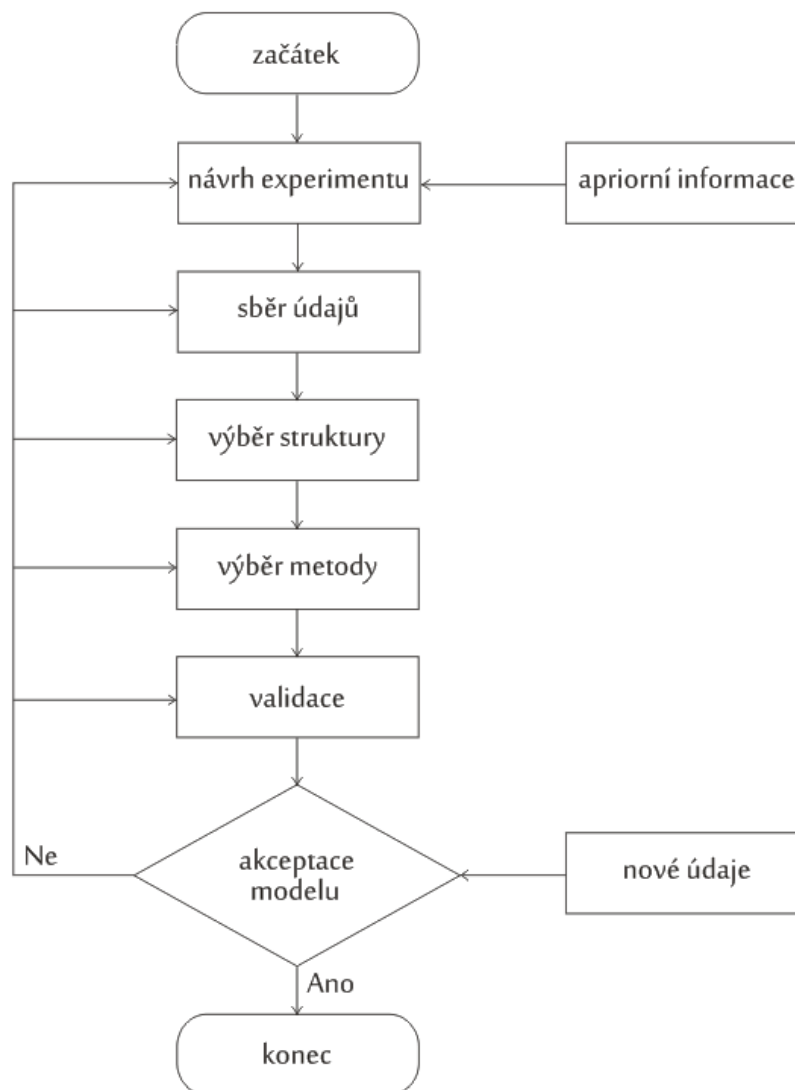
Samotné identifikaci je možné rozumět jako procesu, který ztotožňuje experimentálně získané poznatky a vědomosti o zkoumaném objektu se skutečností. [7]

Jak uvádí zdroj [7] a [8], mezi základní pojmy identifikace systémů patří reálná zařízení a jeho model. Na reálném objektu je nutná možnost vykonávat určitá pozorování (měření) za účelem poznání relací, které v soustavě probíhají. Vytvořený model by se měl pak co nejvíce podobat reálnému objektu za stejných provozních podmínek. Některé objekty jsou vystaveny interakci s prostředím, které do jisté míry může ovlivňovat chování systému samotného. Proto je potřeba zahrnout i vnější vlivy do samotného modelu. [8]

Při identifikaci se zpravidla postupuje ve více etapách, uvádí zdroj [7]. Nejdůležitější krok je navrhnout strukturu matematického modelu za využití apriorních informací a všeobecných fyzikálních zákonitostí. V této etapě se často využívá empirické a poloempirické zkušenosti o identifikovaném procesu. Konstruktor, který celou strukturu navrhl, do ní vnáší subjektivní poznatky a zkušenosti. Díky tomu lze naformulovat strukturu identifikovaného systému ve tvaru matematických rovnic. Parametry těchto rovnic se určují na bázi aposteriorních informací, tedy informací získaných pomocí naměřených vstupně – výstupních údajů. Některé apriorní informace mohou být výsledkem experimentů za použití jiné identifikační metody. Například na základě naměřené přechodové charakteristiky lze usoudit, jestli se jedná o systém prvního nebo vyššího řádu.

Někdy platí navržená struktura pouze na určitou množinu hodnot výstupů a vstupů a pro jiné množiny těchto veličin je potřeba strukturu modelu pozměnit.

Celý schematický postup při identifikaci je znázorněn na níže uvedeném obrázku 3. Někdy je nutné tento postup vícekrát opakovat. Důvodem mohou být numerické problémy při nálezů nejlepšího modelu vzhledem na dané kritérium, nevhodná volba kritéria nebo nedostatečná informovanost o procesu a množině údajů. [7]



Obrázek 3 – Schematický postup při identifikaci [7]

## 2.1 Matematický model

Samotný model lze vytvořit například abstraktně pomocí rovnic. V tom případě se model nazývá matematický [9]. Tato varianta pro sestavení modelu je využita i pro zpracování soustavy spojených nádrží.

Znázornění požadovaných vlastností je dosaženo pomocí algebraických, diferenciálních, diferenčních rovnic, nebo pomocí pravděpodobnostního vztahu relace mezi jednotlivými veličinami v reálném zařízení. [7]

Dle zdroje [9] má použití matematického modelu řadu výhod:

- Umožňuje zjistit informace o chování daného systému, i když vypočítat tohle chování na reálném objektu je značně náročné či nemožné.

- Dlouhodobé a pomalu probíhající procesy v reálném zařízení lze sledovat v průběhu výpočtu modelu.
- Model usnadňuje zobrazení objektivní reality.
- Řešení daného problému lze propočítat v různých variantách.
- Identifikuje vznik chybného poznání objektivní reality.

Základní složky matematického modelu jsou proměnné a konstanty, matematické struktury a řešení. Mezi proměnné se mohou řadit například rozhodovací (řídící) proměnné, vstupní a stavové proměnné, ale také náhodné a výstupní proměnné. Podle popisu modelu lze struktury dělit na analytické, geometrické a topologické, umělé nebo kvalitativní. Dle hlediska cílů modelování jsou pak dělena řešení na přístupné a nepřístupné, maximální a minimální, optimální, výchozí, výsledné či alternativní a aproximativní řešení. [9]

## 2.2 Klasifikace identifikačních metod

Existuje velké množství modelů, které lze identifikovat, ovšem ne každý model vykazuje podobné parametry, aby mohla být použita principiálně shodná metoda identifikace. Proto jsou modely kategorizovány do skupin dle jejich možnosti je identifikovat. [7]

Mezi první dělení patří klasifikace identifikace z aktivního nebo pasivního experimentu. Použití jedné či druhé metody závisí na samotném procesu, na tom, co umožní daná technologie a náročnost experimentu. Je možné tedy na vstupu generovat speciální signály, nebo identifikovat pouze v reálném čase.

Z hlediska matematického aparátu, který je potřebný při zpracování naměřených údajů, lze dělit identifikační metody na deterministické a stochastické. Pod deterministickými metodami se myslí ty, které vyhodnotí speciální signály a numerické metody výpočtu konvolučního integrálu. Pod stochastickým přístupem se rozumí numerické řešení Wiener-Hopfové rovnice. Zahrnují se sem i statistické metody, kde se vychází například z metody nejmenších čtverců a jejich modifikací. Každá ze statistických metod předpokládá určité vlastnosti náhodných poruch a každá vyžaduje jinou míru znalostí jejich vlastností. [7]

Podle způsobu zpracování naměřených údajů lze metody dělit na metody jednorázové a průběžné (rekurzivní). Jednorázové metody lze pak vykonávat manuálně nebo pomocí výpočetní techniky. Manuální metody jsou většinou špatně algoritmizovatelné, protože závisí na subjektivním hodnocení nějakého ukazatele. Někdy se tyto metody nazývají jako off-line. Průběžné metody zpracovávají naměřené údaje postupně, většinou v rámci jedné

periody vzorkování a identifikované parametry se zpřesňují na základě každého dalšího měření. Použití těchto metod se nazývá jako on-line.

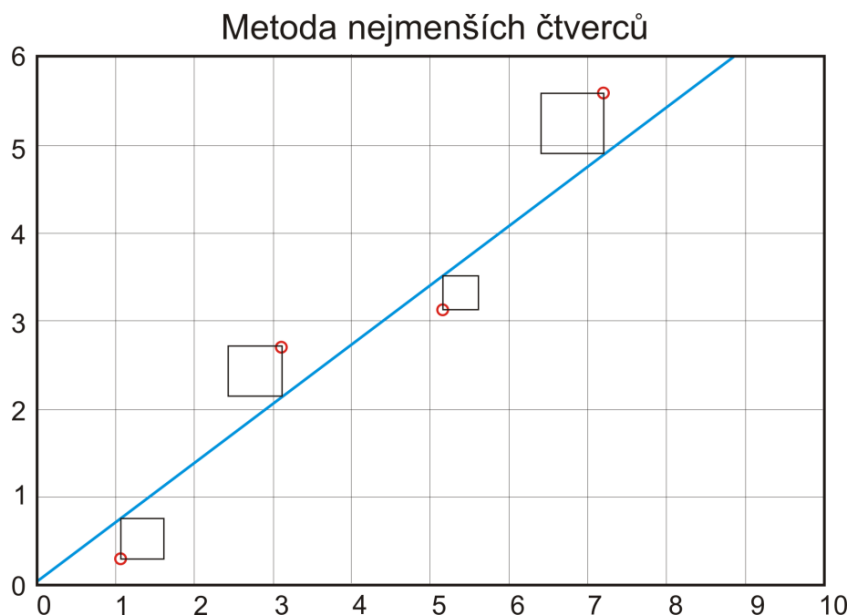
### 2.3 Metoda nejmenších čtverců

Regresní metoda – Metoda nejmenších čtverců (dále označovaná jako MNČ) je využita pro zpracování dat v praktické části této práce.

MNČ je matematicko – statistická metoda používaná zejména při zpracování nepřesných dat. Typicky se jedná o data experimentální, která jsou získána například měřením. Proto se používá ve vědních oborech, kde se s takovými daty lze setkat, jako je statistika, ekonomie, geodézie či zpracování signálů a teorie řízení. [11]

Nejjednodušší aplikací je aproximace naměřených dvojrozměrných dat přímkou. Při složitějším postupu pak lze data prokládat parabolou, obecným polynomem předem daného stupně, nebo obecnou lineární kombinací daných bázeových funkcí. [8]

Cílem MNČ je tedy minimalizace sumy kvadrátů odchylek vstupních hodnot [11]. Na grafu 2 lze vidět jednoduchý případ dvojrozměrných dat proložených přímkou s nejmenší sumou kvadrátů.



Graf 2 - Metoda nejmenších čtverců aplikovaná na dvojrozměrná data

Odvození této metody je uvedeno dle zdroje [7] a [8].

Pokud se uvažuje skalární případ rovnice, potom platí:

$$\hat{y}(k) = a_0 + a_1 f_1(k) + a_2 f_2(k) + \dots + a_r f_r(k) + e(k) = a_0 + \sum_{i=1}^r a_i f_i(k) + e(k) \quad (1)$$

přičemž  $a_1, a_2, \dots, a_r$  jsou neznámé parametry s absolutním členem  $a_0 = 0$

Chyba  $e(k)$  pak může být vyjádřena jako rozdíl naměřených hodnot a modelovaných hodnot vypočítaných regresním výpočtem:

$$e(k) = y(k) - y_m(k) = y(k) - \sum_{i=1}^r a_i f_i(k) \quad (2)$$

Hledá se taková hodnota  $\hat{a}_i$ , která by minimalizovala kvadratické kritérium, tedy součet druhých mocnin odchylek naměřených údajů od modelovaných vstupů.

$$J = \sum_{k=1}^N e^2(k) = \sum_{k=1}^N \left[ y(k) - \sum_{i=1}^r a_i f_i(k) \right]^2 \quad (3)$$

Tohle kritérium nabývá minima, jestliže jsou parciální derivace podle jednotlivých parametrů rovny nule, čímž se získá soustava  $N$  rovnic o  $r$  neznámých. Řešením těchto rovnic jsou odhady parametrů  $\hat{a}_i$ .

Při větším množství rovnic je přehlednější práce s maticemi, jelikož umožňují jednoduchý zápis složitých výrazů a usnadňují programování algoritmů.

Soustava  $N$  rovnic, která je odvozená postupným odvozováním naměřených hodnot má tvar:

$$\begin{aligned} y(1) &= a_1 f_1(1) + a_2 f_2(1) + \dots + a_r f_r(1) + e(1) \\ y(2) &= a_1 f_1(2) + a_2 f_2(2) + \dots + a_r f_r(2) + e(2) \\ &\vdots \\ y(N) &= a_1 f_1(N) + a_2 f_2(N) + \dots + a_r f_r(N) + e(N) \end{aligned} \quad (4)$$

Pak je možné definovat vektory:

$$\begin{aligned} y^T &= [y(1) \quad y(2) \quad \dots \quad y(N)] \\ \theta^T &= [a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_r] \\ e^T &= [e(1) \quad e(2) \quad \dots \quad e(N)] \end{aligned} \quad (5)$$

a také definovat matici o rozměru  $(N, r)$ :

$$F = \begin{bmatrix} f_1(1) & f_2(1) & \cdots & f_r(1) \\ f_1(2) & f_2(2) & \cdots & f_r(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_1(N) & f_2(N) & \cdots & f_r(N) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Soustavu rovnic lze zapsat pomocí maticové rovnice,

$$y = F\theta + e \quad (7)$$

z čehož plyne i rovnice pro chybu.

Jelikož je nutné minimalizovat kvadratické kritérium  $J$ , lze jej pomocí vektorových zápisů definovat vztahem:

$$J = e^T e = (y - F\theta)^T (y - F\theta) \quad (8)$$

Kritériální minimum lze získat, když se jeho derivace podle parametru  $\theta$  položí rovna 0.

$$\left. \frac{\partial J}{\partial \theta} \right|_{\theta = \hat{\theta}} = 0 \quad (9)$$

Po použití vztahu pro derivaci součinu vektorů lze získat vztah:

$$\frac{\partial J}{\partial \hat{\theta}} = -2F^T (y - F\hat{\theta}) = 0 \quad (10)$$

Řešením rovnice lze získat základní maticový tvar pro odhad metodou nejmenších čtverců.

$$\hat{\theta} = (F^T F)^{-1} F^T y \quad (11)$$

Tohle řešení je ovšem použitelné pouze v případě, že matice  $F$  je čtvercová, tj.  $N = r$ . Pokud tomu tak není, je nutné výslednou rovnici dále upravit. [7], [8]

## 2.4 Rekurzivní metoda nejmenších čtverců

Rekurzivní identifikační metody nabyly důležitého významu v momentě, kdy u jednorázových identifikačních metod musely být opakovaně počítány algoritmy kvůli nově naměřeným údajům a to v plném rozsahu. Právě tato opakování s sebou nesou náročnost na velikost paměti při uchovávání všech naměřených údajů. Tím se zvyšuje výpočetní složitost a prodlužuje se doba výpočtu. Například u MNČ je náročná a navíc klíčová operace inverze matice  $F^T F$ . [8]

Rekurzivní metody umožňují sledovat změny parametrů (vlastností) procesu v čase. Odhady parametrů  $\hat{\theta}(k)$  v kroku  $k$  jsou získávány z nových dat, kterými se opraví staré odhady  $\hat{\theta}(k-1)$  v čase  $k-1$ . Nově naměřená data se tedy využívají pouze pro korekci předchozích odhadů, tím klesá výpočetní složitost a náročnost na výpočetní prostředky.

Podle zdroje [7], [8] je rekurzivní metoda nejmenších čtverců (dále označována jako RMNČ) jednou z nejpoužívanějších a v této práci je tato metoda průběžné identifikace také využita.

Pro výpočet RMNČ se vychází z jednorázové metody, tedy vztahu:

$$\hat{\theta} = (F^T F)^{-1} F^T y \quad (12)$$

Jestliže se použije  $k-1$  pozorování, lze napsat modifikovaný tvar rovnice jako:

$$\hat{\theta}(k-1) = (F_{k-1}^T F_{k-1})^{-1} F_{k-1}^T y(k-1) \quad (13)$$

Kde transponovaný vektor výstupních veličin pro daný časový interval je roven:

$$y^T(k-1) = [y(1) \quad y(2) \quad \dots \quad y(k-1)] \quad (14)$$

a transponovaný vektor optimálních odhadů na základě  $k-1$  pozorování je roven:

$$\hat{\theta}^T(k-1) = [\hat{\theta}_1(k-1) \quad \hat{\theta}_2(k-1) \quad \dots \quad \hat{\theta}_r(k-1)] \quad (15)$$

Modifikovanou matici  $F$  pro  $k-1$  pozorování lze uvést následovně:

$$F_{k-1} = \begin{bmatrix} f_1(1) & f_2(1) & \dots & f_r(1) \\ f_1(2) & f_2(2) & \dots & f_r(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_1(k-1) & f_2(k-1) & \dots & f_r(k-1) \end{bmatrix} \quad (16)$$

Jestliže se uskuteční další měření pro získání nových  $k$  hodnot a  $y(k)$  se označí jako:

$$y(k) = \begin{bmatrix} y(k-1) \\ y(k) \end{bmatrix} \quad (17)$$

Poté lze matici optimálních odhadů přepsat do tvaru:

$$F_{k-1} = \begin{bmatrix} f_1(1) & f_2(1) & \dots & f_r(1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_1(k-1) & f_2(k-1) & \dots & f_r(k-1) \\ f_1(k) & f_2(k) & \dots & f_r(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{k-1} \\ \hat{\phi}^T(k) \end{bmatrix} \quad (18)$$

Kde poslední řádek matice  $F$  je vyjádřen jako vektor:

$$\hat{\phi}^T(k) = [f_1(k) \quad f_2(k) \quad \cdots \quad f_r(k)] \quad (19)$$

Pro  $k$ -tou pozorovatelnou hodnotu  $y(k)$  platí:

$$y(k) = \theta_1 f_1(k) + \theta_2 f_2(k) + \cdots + \theta_r f_r(k) + e(k) \quad (20)$$

Což se dá vektorově vyjádřit jako:

$$y(k) = \Theta^T \phi(k) + e(k) \quad (21)$$

Kde  $\Theta^T$  představuje:

$$\Theta^T = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \cdots \quad \theta_r] \quad (22)$$

## 3 ZÁKLADNÍ POPIS A PRINCIP PREDIKTIVNÍHO ŘÍZENÍ

### 3.1 Vývoj a popis prediktivního řízení

Jednou z metod návrhu řízení je prediktivní řízení. MPC se výrazně rozvinulo v průběhu posledních dvou desetiletí a to jak v řídicí oblasti, tak v průmyslu. Tento úspěch lze přičíst skutečnosti, že se jedná snad o nejběžnější způsob představující vyřešení problému řízených procesů v reálné časové oblasti. MPC integruje optimální řízení na stochastické procesy, procesy s dopravním zpožděním, nebo také obecně na nelineární systémy, které se často v průmyslu vyskytují. Další výhodou MPC je možnost zahrnutí vstupních nebo výstupních omezení, které reálný objekt představuje. Tato omezení se zahrnují již při návrhu prediktivního regulátoru. Mezi další výhody tohoto řízení patří mnohostranná využitelnost a robustnost řídicích algoritmů. Ve srovnání s PID regulátory je kvalita řízení obvykle vyšší. [3]

Jak uvádí zdroj [2] a [3], MPC ještě nedosáhl v průmyslu takové popularity, kterou naznačuje jeho potenciál. Jedním z důvodů je to, že jeho realizace vyžaduje určité matematické složitosti, které nejsou problémem zabývající se výzkumné obce, kde matematické balíčky jsou obvykle plně k dispozici, ale které představují nevýhodu ze strany techniků pro použití v praxi.

Ve své podstatě je MPC založeno na diskrétních modelech a odvození algoritmů pro řízení je realizováno hlavně v diskrétní oblasti. [10], [12]

Dle zdroje [10], [12] jsou pod souslovím prediktivní řízení chápány třídy metod řízení, které mají společné charakteristiky.

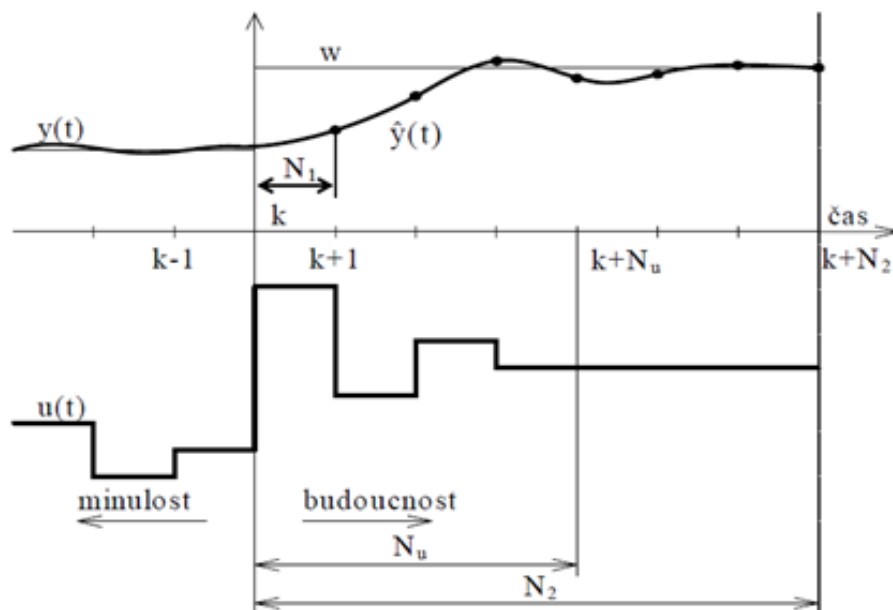
- Na predikci budoucího řízení výstupu daného systému je použit matematický model.
- V budoucím čase je znám průběh trajektorie žádané hodnoty, kterou má regulovaná veličina dosáhnout.
- Výpočet posloupnosti budoucích řídicích zásahů zahrnuje minimalizaci vhodné účelové funkce s budoucími trajektoriemi přírůstků řízení a regulační odchylky.
- Z celkového množství vypočtených predikcí se realizuje pouze první akční zásah a celý postup minimalizace funkcionář se opakuje v další periodě vzorkování.

### 3.2 Princip prediktivního řízení

Základní princip prediktivního řízení je znám jako „strategie pohyblivého bodu“ a lze jej shrnout do několika následujících bodů. Tento níže uvedený postup proběhne v rámci jedné periody vzorkování. Grafické znázornění je uvedeno na Obrázku 4. [12]

1. V prvním kroku je potřeba použít vytvořený model zkoumaného procesu na predikci  $N$  budoucích výstupů procesu  $\hat{y}$ . Predikce jsou vypočítány vzhledem k neznámé trajektorii akčních zásahů a vzhledem k informacím, které jsou dostupné do času  $k$ .
2. Ve druhé části se určí trajektorie budoucích akčních zásahů díky vyřešení optimalizačního problému. Optimalizace obsahuje vhodnou účelovou funkci a případná omezení, která jsou dána procesem. Samotná účelová funkce pak dále obsahuje budoucí predikce výstupu, budoucí trajektorii žádané veličiny a budoucích akčních zásahů.
3. Jakmile jsou vypočítány veškeré predikce a je určena sada budoucích akčních zásahů dle dané trajektorie, lze je aplikovat do procesu. Pro řízení se však využije pouze první člen určeného akčního zásahu  $u(k)$ .

Po vykonání výše zmíněných výpočtů, které probíhají za čas jedné stanovené periody vzorkování, se postup shodně opakuje pro nově získaná data.



Obrázek 4 – Princip prediktivního řízení [12]

$N_1$ .....	minimální horizont	$\hat{y}(t)$ .....	budoucí výstup procesu
$N_2$ .....	maximální horizont	$u(t)$ .....	akční zásah
$N_u$ .....	řídící horizont	$w$ .....	žádaná hodnota
$y(t)$ .....	výstup procesu	$k$ .....	čas

### 3.3 Modely procesů

Model je základním stavebním kamenem prediktivního řízení a jeho výběr je nejdůležitější součástí celého řízení. Pokud by byl model špatně zvolen, může být dosaženo nízké kvality při řízení samotného procesu. [2]

Celková koncepce by měla zahrnovat nezbytné požadavky pro získání co nejlepšího modelu. Ten by měl být natolik úplný, aby bylo možné vystihnout dynamiku procesu a také umožnit výpočet predikce. Nejčastěji volenými modely jsou modely lineární, které jsou do jisté míry předvídatelné a pokud jsou bez omezení, lze vypočítat trajektorii akčních zásahů. [3]

Různé strategie MPC mohou používat různé modely představující vztah mezi výstupy a měřitelnými vstupy. V reálných procesech mohou nastat nepředvídatelné chyby a poruchy. I s tímto ohledem je vhodné volit daný model, jelikož některé vybrané modely v sobě zahrnují i model poruchy, jiné zase počítají s poruchou jako konstantou.

Prvním zmíněným typem modelu je impulsní odezva, jak se lze dočíst ve zdroji [3] a [12]. Tento model známý také jako FIR (finite impulse response) je v praxi velmi vítán. Je intuitivní a jasně odráží vliv každé akční veličiny na daném výstupu. Velkou výhodou impulsní odezvy je to, že není potřeba žádných předchozích informací o procesu. Naopak nevýhodou je poznatek, že může popisovat pouze stabilní procesy a potřebuje vysokou hodnotu stupně polynomu. Výstup je se vstupem spojen rovnicí,

$$y(k) = \sum_{i=1}^{\infty} h_i u(k-i) \quad (23)$$

kde  $h_i$  je vzorkovaný výstup při vybuzení procesu jednotkovým impulsem.

Dalším typem modelu je model založený na přechodové funkci. Pro stabilní procesy se používá diskretní přechodová funkce omezená na několik prvních členů. Tento model má

stejně výhody i nevýhody jako impulsní odezva. Pro stabilní systémy je výstup se vstupem spojen rovnicí [3],

$$y(k) = y_0 + \sum_{i=1}^N g_i \Delta u(k-i) \quad (24)$$

kde  $g_i$  jsou vzorkované výstupní hodnoty pro požadovanou skokovou změnu na vstupu a

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1). \quad (25)$$

Model založený na přenosové funkci je běžně používán například v metodě GPC (Generalized Predictive Control), UPC (Unified Predictive Control) a dalších, uvádí zdroj [2] a [3].

Vztah mezi vstupem a výstupem je definován jako:

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k) \quad (26)$$

kde polynomy  $A(z^{-1})$  a  $B(z^{-1})$  představují:

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n} \\ B(z^{-1}) &= b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_n z^{-n} \end{aligned} \quad (27)$$

Výhodou tohoto modelu je možnost jeho použití i pro nestabilní procesy, ale znalost zkoumaného procesu je zásadní, neboť je potřeba znát řád polynomů  $A$  a  $B$ .

U stavových modelů je značnou výhodou jejich snadné rozšíření z jednorozměrných systémů na mnohorozměrné systémy. Výpočty mohou být složité navíc s nutností pozorovatele stavů, pokud nejsou dostupné. V diskrétním stavovém popisu je jejich model dán jako:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) &= Cx(k) + Du(k) \end{aligned} \quad (28)$$

, kde  $x$  označuje stavový vektor,  $y$  stanovuje výstupy procesu,  $u$  stanovuje vstupy procesu. Prvky  $A, B, C, D$  jsou matice definující stavový model. Při reálných procesech je obvykle  $D = 0$ . [2], [3]

Model CARIMA, je jednorozměrný model a má tvar:

$$A(q^{-1})y(k) = B(q^{-1})u(k-1) + \frac{C(q^{-1})}{\Delta} e_s(k) \quad (29)$$

Polynom B má nenulový koeficient, jelikož je v modelu použito již  $u(k-1)$ . Další hodnotu akčního zásahu je potřeba spočítat. [12]

Pro reprezentaci procesu, zejména těch nelineárních, lze využít i další možnosti libovolných modelů. Pokud jsou tyto modely značně složitější, je potřeba také myslet na výpočetní náročnost při optimalizaci. V poslední době jsou rozvíjeny modely na základě neuronových sítí fuzzy logiky. [12]

### 3.4 Účelová funkce

Různé typy MPC algoritmů využívají pro řízení různé typy účelových funkcí. Obecným cílem je to, aby se budoucí výstup  $y$  na uvažovaném horizontu řídil dle referenčního signálu  $w$  za pomoci akčního zásahu  $u$ . [12]

Obecný výraz pro tyto funkce je:

$$J(N_1, N_2, N_u) = \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta(j) [\hat{y}(t+j|t) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) [\Delta u(t+j-1)]^2 \quad (30)$$

Parametry  $N_1$  a  $N_2$  jsou minimální a maximální predikční horizonty. Oba mají poměrně intuitivní význam – označují dobu, kdy je potřeba sledovat trajektorii žádané veličiny. Pokud je hodnota  $N_1$  volena vyšší, nejsou pro regulaci důležité první okamžiky a vzniká tak hladká odezva procesu. Lze se tím také vyhnout problému s neminimálně fázovým systémem. Maximální horizont pak pokrývá důležitou část přechodové charakteristiky, proto se obvykle volí jako hodnota, za kterou výstupní veličina přejde z 10% na 90% své ustálené hodnoty. [3]

Řídicí horizont je značen jako  $N_u$ . Tento horizont se nemusí shodovat s maximálním horizontem a snižuje se jím výpočtová náročnost metody.

Koeficienty  $\delta(j)$  a  $\lambda(j)$  jsou sekvence, kterými lze ovlivňovat budoucí chování. Obvykle jsou voleny jako konstantní hodnoty nebo ve formě exponenciálních vah.

Standardní účelová funkce obsahuje kvadratické členy regulační odchylky a přírůstky řízení na konečném horizontu do budoucnosti [3]

$$J = E \left\{ \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta(j) [\hat{y}(k+j) - w(k+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) [\Delta u(k+j-1)]^2 \right\} \quad (31)$$

kde  $E$  představuje operátor střední hodnoty,  $\hat{y}(k+j)$  je výstup  $j$  kroků do budoucnosti, které jsou predikovány vzhledem k dostupným informacím do času  $k$ . Posloupnost žádané hodnoty je zastoupena pomocí  $w(k+j)$  a budoucí přírůstky řízení, které mají být vypočítány, jsou představovány pomocí  $\Delta u(k+j-1)$ .

Jednou z výhod prediktivního řízení je referenční trajektorie. Pokud je tato žádaná hodnota známá, systém může reagovat dříve, než ve skutečnosti došlo ke změně, čímž se zabrání zpoždění v odezvě procesů. Budoucí vývoj žádané hodnoty je předem znám v mnoha aplikacích, jako je například robotika, servopohony nebo dávkové procesy. [2]

Zdroje [12] uvádí, že pokud trajektorie žádané hodnoty není známá, nejčastěji se uvažuje ve formě konstanty rovnou aktuální hodnotě, nebo plynule přecházející ke konečné hodnotě žádané veličiny. Jde obvykle o hladkou aproximaci od aktuální hodnoty výstupu pomocí systému prvního řádu.

$$w(t) = y(t) \tag{32}$$

$$w(t+k) = \alpha w(t+k-1) + (1-\alpha)r(t+k), \quad k = 1 \dots N$$

Parametr  $\alpha$  je hodnota mezi 0 a 1 a určuje plynulost trajektorie. Čím více se hodnota blíží 1, tím je průběh pomalejší. Tato hodnota má tedy vliv na dynamické chování celého systému.

Stejného efektu lze dosáhnout za použití polynomu  $P(z^{-1})$ . Filtr, který odpovídá trajektorii prvního řádu za využití tohoto polynomu, je dán vztahem:

$$P(z^{-1}) = \frac{1 - \alpha z^{-1}}{1 - \alpha} \tag{33}$$

Požadovaným cílem prediktivního řízení je sekvence budoucích hodnot změny akčního zásahu, které jsou spočítány tak, aby bylo minimalizováno vybrané kritérium.

### 3.5 Omezení

Jedním z hlavních důvodů oblíbenosti prediktivního řízení je jeho schopnost pracovat s omezením, které bere systematicky v úvahu, a tím pádem umožňuje lepší a kvalitnější řízení. Většina omezení je v praxi způsobena konstrukčními nebo provozními podmínkami, ale mohou být také dána jistá doporučení s ohledem na životní prostředí, či bezpečnost na pracovišti. Pro účely řízení jsou nejčastěji rozdělovány na tvrdá a měkká omezení. [2]

Nejjednodušším a nejpoužívanějším způsobem aplikace omezení je analytické řešení optimalizační úlohy bez omezení a následná aplikace omezení na výsledek, nejčastěji ve formě saturace. Tohle jednoduché řešení ovšem nezaručí optimální řízení podle zvolených kritérií a navíc lze aplikovat pouze na veličiny, které vystupují z algoritmu optimalizace, tedy na akční zásah a změny akčního zásahu. Z tohoto důvodu jsou omezení zahrnuta už při řešení daného optimalizačního problému. Touto variantou lze omezit nejen veličiny vystupující z algoritmu, ale i samotný výstup, či jednotlivé stavy systému, jedná-li se o stavový model. [12]

Jestliže se optimalizuje vybrané kritérium a zároveň je potřeba zahrnout omezení vstupních a výstupních veličin, pak je nutné použít numerické optimalizační metody výpočtu, neboť tento problém již nejde řešit analyticky. [12]

### 3.5.1 Tvrdá omezení

Tvrdá omezení jsou fyzická omezení procesů, která nemohou být žádným způsobem odstraněna, jako je například rozběhová rychlost pohonů nebo regulační ventil armatury, který lze otevřít maximálně na 100%. [2]

U nastavení regulátoru nemá smysl žádat vyšší nebo nižší hodnotu, než v rozmezí, které je jasně dané, neboť nemůže být dosažena. Pouze by došlo k nesouladu mezi předpokládaným chováním systému a jeho skutečným chováním, což by mohlo mít nepředvídatelné následky.

Nejčastěji používaná omezení jsou následující:

- Omezení změny akčního zásahu

$$\Delta u_{min} \leq u(k) - u(k - 1) \leq \Delta u_{max} \quad (34)$$

- Omezení akčního zásahu

$$u_{min} \leq u(k) \leq u_{max} \quad (35)$$

- Omezení výstupní veličiny

$$y_{min} \leq y(k) \leq y_{max} \quad (36)$$

- Omezení překmitu

$$y(k + j) \leq w(k) \quad (37)$$

### 3.5.2 Měkká omezení

Měkké vazby jsou ty, které by měly být, pokud je to možné, splněny. Mezi měkká omezení patří například taková omezení teploty a tlaku, která zabrání poškození zařízení vlivem únavy materiálu. Pokud je to ovšem nezbytné, mohou být stanovené meze překročeny o předem danou toleranci  $\varepsilon$ . Obvykle se tato omezení definují na výstupy či stavy, ale mohla by být aplikována i na vstupu do systému. [2]

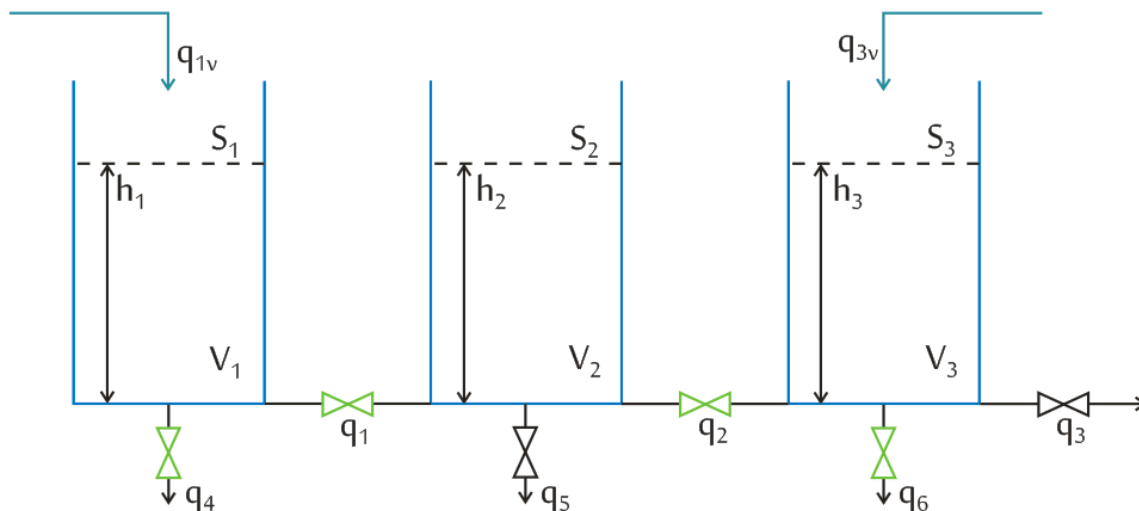
Pokud měkká omezení posunují hranice tvrdých omezení výstupu soustavy uvolněním horní meze o  $\varepsilon_{max}$  a spodní meze o  $\varepsilon_{min}$ , mohou být vyjádřena následujícími nerovnostmi.

$$\begin{aligned}y(k) &\leq y_{max} + \varepsilon_{max} \\y(k) &\geq y_{min} + \varepsilon_{min}\end{aligned}\tag{38}$$

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 MATEMATICKÝ MODEL

Tato kapitola je věnována sestavení matematického modelu řízené soustavy na základě matematicko-fyzikální analýzy. Na obrázku 5 je zobrazena aktuální konfigurace systému, která byla popsána v kapitole 1.3.



Obrázek 5 Schéma modelu spojených nádrží

$q_{1v}, q_{3v}$  .....vstupní přítok do zásobníků 1 a 3

$h_1, h_2, h_3$  .....výška hladiny v jednotlivých zásobnících

$q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6$  ..... průtok jednotlivými ventily

$V_1, V_2, V_3$  .....objemy v jednotlivých nádržích

$S_1, S_2, S_3$  .....plocha hladiny v zásobnících

Pro odvození nelineárního matematického modelu, který je charakteristický tím, že alespoň jedna vazba mezi veličinami je nelineární, se nejprve musí sestavit bilanční rovnice pro jednotlivé subsystémy. Tyto základní rovnice jsou založeny na předpokladu ideálních vlastností jednotlivých složek, jako například ideální tok tekutiny potrubím.

Nejprve byla tedy vyjádřena bilanční rovnice pro každou nádrž. Jestliže jsou objemy těchto nádrží vyjádřeny pomocí proměnné  $V_1, V_2, V_3$ , mají rovnice tvar:

$$\begin{aligned}
 q_{1v}(t) &= q_1(t) + q_4(t) + \frac{dV_1(t)}{dt} \\
 q_1(t) - q_2(t) &= \frac{dV_2(t)}{dt} \\
 q_{2v}(t) &= -q_2(t) + q_6(t) + \frac{dV_3(t)}{dt}
 \end{aligned} \tag{39}$$

Změny objemů nádrží v čase lze vyjádřit pomocí výšky hladiny, neboť jsou průřezy jednotlivých zásobníků konstantní.

$$dV_i = S dh_i, \quad i = 1, 2, 3 \tag{40}$$

Rovnice (40) byla dosazena do jednotlivých bilančních rovnic, čímž byly získány diferenciální rovnice pro zjednodušený matematický model nelineárního systému.

Níže uvedené rovnice jsou zapsány postupně v pořadí pro 1., 2. a 3. nádrž.

$$\begin{aligned}
 S_1 \cdot \frac{dh_1}{dt} &= q_{1v}(t) - q_1(t) - q_4(t) \\
 S_2 \cdot \frac{dh_2}{dt} &= q_1(t) - q_2(t) \\
 S_3 \cdot \frac{dh_3}{dt} &= q_{2v}(t) + q_2(t) - q_6(t)
 \end{aligned} \tag{41}$$

Takto byly získány diferenciální rovnice pro nelineární model s počáteční podmínkou  $h(0) = h^s$  pro hladiny v jednotlivých zásobnících.

Jelikož jsou všechny nádrže stejně velké a mají tím pádem stejný průměr, je zavedena jedna veličina pro plochu hladiny v zásobnících.

$$S = S_1 = S_2 = S_3 \tag{42}$$

Vzhledem k tomu, že není předem jasné, jestli bude vyšší hladina v první nádrži, nebo v nádrži poslední a tím pádem jestli bude voda do prostřední nádrže přes ventily 1 a 2 (viz. Obrázek 2) přitékat, nebo odtékat, musí být zavedena funkce *signum*, která při změně výšky hladiny změní znaménko z kladného na záporné a naopak. Navíc je pro průtoky ventilů známo, že průtok kapaliny je úměrný druhé mocnině z rozdílů momentálních tlaků kapaliny před a za ventilem. V tomto případě jde o hydrostatické tlaky úměrné výškám jednotlivých hladin v nádržích. Díky těmto poznatkům lze rovnice přepsat do tvaru:

$$\begin{aligned}S \cdot \frac{dh_1}{dt} &= q_{1v}(t) - k_1 \cdot \text{sign}[h_1(t) - h_2(t)] \cdot \sqrt{|h_1(t) - h_2(t)|} - q_4(t) \\S \cdot \frac{dh_2}{dt} &= k_1 \cdot \text{sign}[h_1(t) - h_2(t)] \cdot \sqrt{|h_1(t) - h_2(t)|} - k_2 \\&\quad \cdot \text{sign}[h_2(t) - h_3(t)] \cdot \sqrt{|h_2(t) - h_3(t)|} \\S \cdot \frac{dh_3}{dt} &= q_{2v}(t) + k_2 \cdot \text{sign}[h_2(t) - h_3(t)] \cdot \sqrt{|h_2(t) - h_3(t)|} - q_6(t)\end{aligned}\tag{43}$$

kde  $k_1$  a  $k_2$  jsou koeficienty ventilů 1 a 2.

Výše uvedené rovnice (43) jsou opět zapsány postupně v pořadí pro 1., 2. a 3. nádrž.

## 5 SIMULACE

Jelikož je model ovládán počítačem pomocí programu Matlab, Simulink (viz. kapitola 1.1), byla veškeré schémata pro simulace a reálná měření vytvořena v tomto prostředí.

V této kapitole jsou postupně uvedeny jednotlivé části v rámci simulační části práce. Nejprve byl sestaven simulační model, který se stal základním prvkem v průběhu simulací. V první části byl využit na simulaci statických a dynamických vlastností soustavy. Poté byl model zidentifikován vybuzením systému daným signálem a z odezvy výstupních veličin byly vypočítány parametry pro regulaci. Následně byl navrhnout prediktivní regulátor, který byl implementován v podobě S-funkce do regulačního obvodu. V poslední části simulačního zpracování byly provedeny regulace s pevně nastavenými parametry i s průběžnou identifikací.

### 5.1 Simulační model jako S-funkce

*S-funkce* poskytuje výkonný mechanismus pro rozšíření schopností Simulinku, neboť dovolují přidat uživatelský algoritmus v podobě bloku do modelu. Zdrojový kód lze napsat jako *M-file* v Matlabu, nebo v jazyce C. Forma *S-funkce* vyhovuje pro spojité, diskrétní i hybridní systémy. [13]

Rovnice matematického modelu (43) byly pro potřeby simulačního modelu přepsány do tvaru:

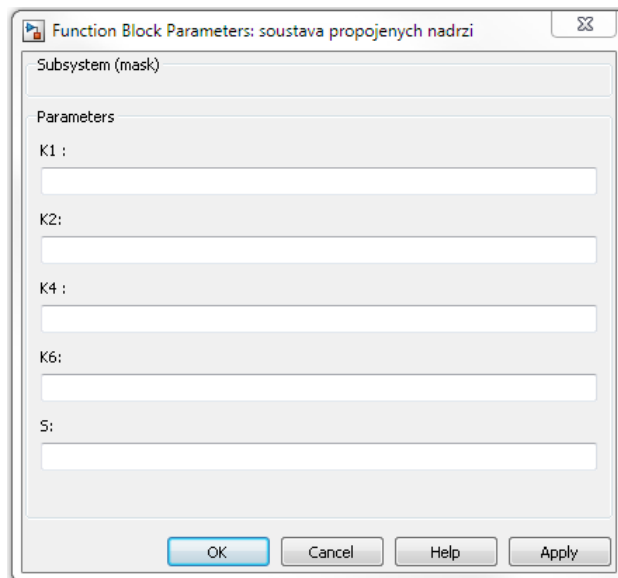
$$\begin{aligned} \frac{dh_1}{dt} &= \frac{1}{S} \cdot q_{1v}(t) - \frac{k_1}{S} \cdot \text{sign}[h_1(t) - h_2(t)] \cdot \sqrt{|h_1(t) - h_2(t)|} - \frac{k_4}{S} \cdot \sqrt{|h_1(t)|} \\ \frac{dh_2}{dt} &= \frac{k_1}{S} \cdot \text{sign}[h_1(t) - h_2(t)] \cdot \sqrt{|h_1(t) - h_2(t)|} - \frac{k_2}{S} \cdot \text{sign}[h_2(t) - h_3(t)] \\ &\quad \cdot \sqrt{|h_2(t) - h_3(t)|} \\ \frac{dh_3}{dt} &= \frac{1}{S} \cdot q_{2v}(t) + \frac{k_2}{S} \cdot \text{sign}[h_2(t) - h_3(t)] \cdot \sqrt{|h_2(t) - h_3(t)|} - \frac{k_6}{S} \cdot \sqrt{|h_3(t)|} \end{aligned} \quad (44)$$

Pro tento zápis bylo využito podoby S-funkce psané jako m-file.



Obrázek 6 – Nalevo blok (maska) reprezentující model v Simulinku, napravo blok pro S-funkci

Funkční blok reprezentovaný v Simulinku přijímá 5 hodnot na vstupu – první čtyři hodnoty jsou koeficienty ventilů  $k_1, k_2, k_4$  a  $k_6$ , pátá hodnota reprezentuje plochu nádrží, která je u všech tří nádrží stejná. Jednotky, ve kterých se hodnoty do systému zadávají, nejsou předem dané, ale musí si navzájem odpovídat.



Obrázek 7 – Funkční blok pro zadávání parametrů do S-funkce simulačního modelu

Samotná implementace modelu je větvena do 5 základních částí pomocí příkazu *switch*. V prvním stavu probíhá inicializace systému, ve druhém je zavolaná funkce pro výpočet odvozených rovnic matematického modelu, přičemž funkce *signum* je realizována pomocí podmínky *if*. Ve třetím stavu probíhá aktualizace a ve čtvrtém se zavolá funkce výstupu, která vrací vypočítané hodnoty pro S-funkci ve vektorovém tvaru. Pátý stav zajišťuje chybová hlášení. Zdrojový kód S-funkce je zobrazen v příloze P II.

Hodnoty koeficientů ventilů reálného systému nelze přesně změřit, proto byly do simulačního modelu dosazeny pouze jejich odhady. To způsobuje odlišné chování modelu a reálného systému. Více je tato problematika popsána v kapitole 1.2.

## 5.2 Statické a dynamické vlastnosti

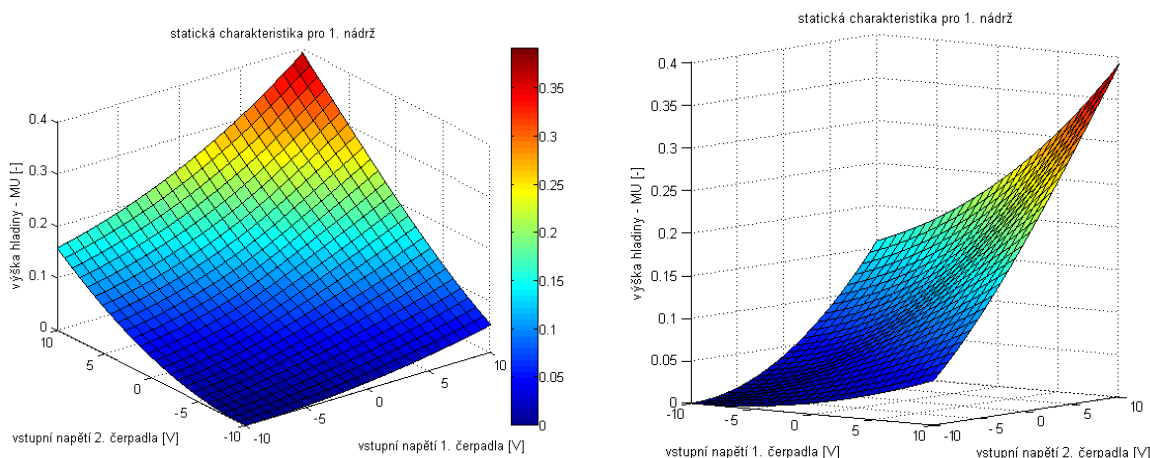
### 5.2.1 Statická charakteristika modelu

Na vytvořeném modelu byly namodelovány statické charakteristiky pro jednotlivé nádrže. Pro tento účel byl vytvořen skript, který v cyklu *for* opakovaně volá simulační schéma s modelem spojených nádrží. Dle nastaveného kroku v cyklu se zadávají vstupní napětí čerpadel.

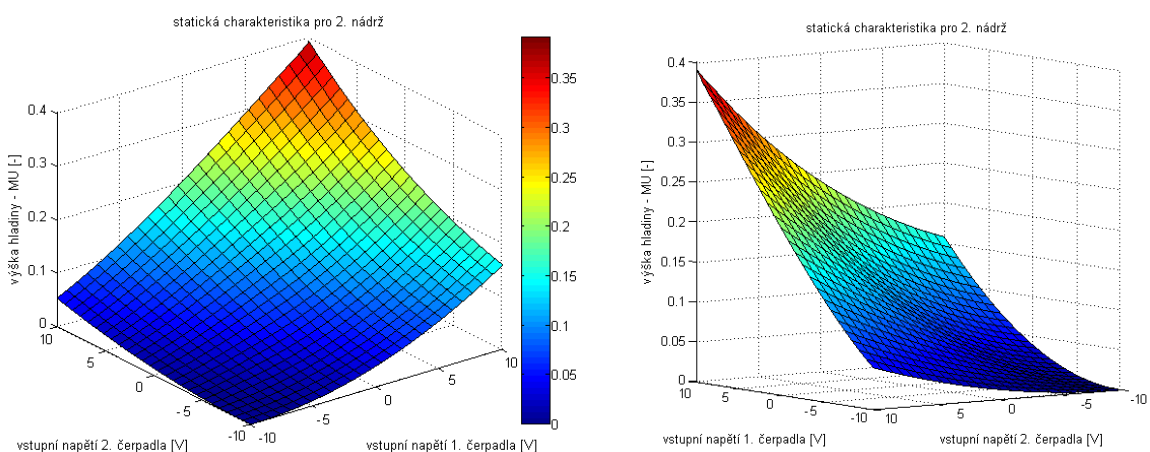
Pro koeficienty ventilů byla při měření statické charakteristiky použita hodnota  $k = 40 \frac{cm^5}{s}$ . Plocha v nádržích byla vypočítána dle jejich vnitřního průměru, který je uveden v kapitole 1.2. Celková plocha je pak rovna  $S = 154 cm^2$ .

Při nastavených hodnotách byly na výstupu programu dvě matice o rozměrech  $(25 \times 25)$  pro obě výšky hladiny v zásobnících.

Statická charakteristika pro první nádrž je uvedena na grafu 3 a pro poslední nádrž je charakteristika vyobrazena na grafu 4.



Graf 3 – Nasimulovaná statická charakteristika pro výšku hladiny v 1. nádrži



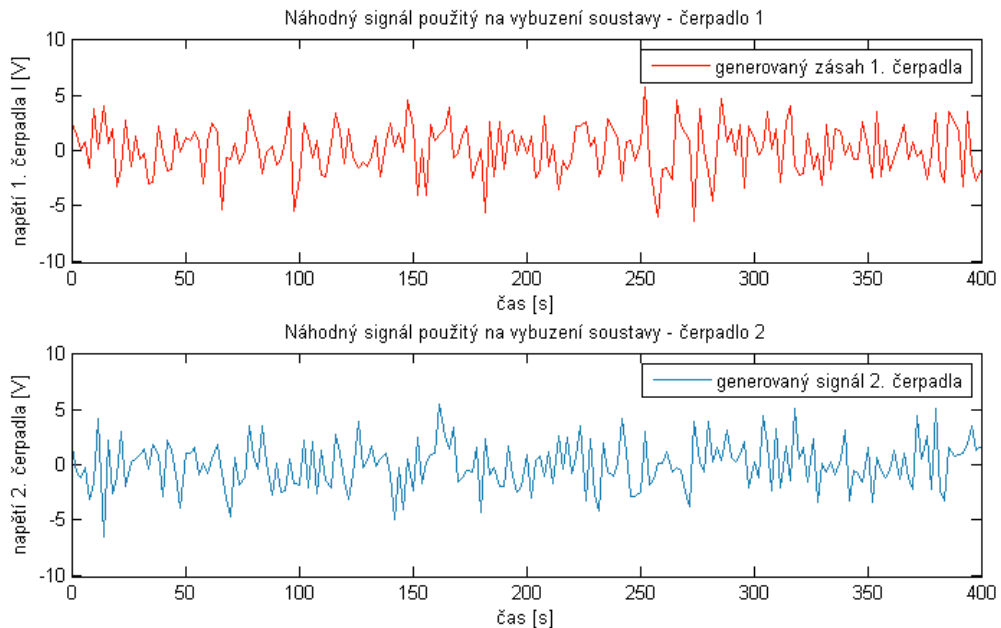
Graf 4 – Nasimulovaná statická charakteristika pro výšku hladiny v poslední nádrži

Namodelovaná statická charakteristika potvrdila nelinearitu modelu. Pro oblast řízení byla vybrána oblast v intervalu od  $\langle 0,1MU; 0,25MU \rangle$ .

### 5.2.2 Identifikace systému

Identifikace systému byla provedena vybuzením systému náhodným signálem s Gaussovým rozložením. Takto vygenerovaný signál reprezentoval akční zásah pro obě čerpadla. Jejich grafické zobrazení lze pozorovat na grafu 5.

Veličiny na níže uvedených grafech jsou vzorkovány s periodou 2s.



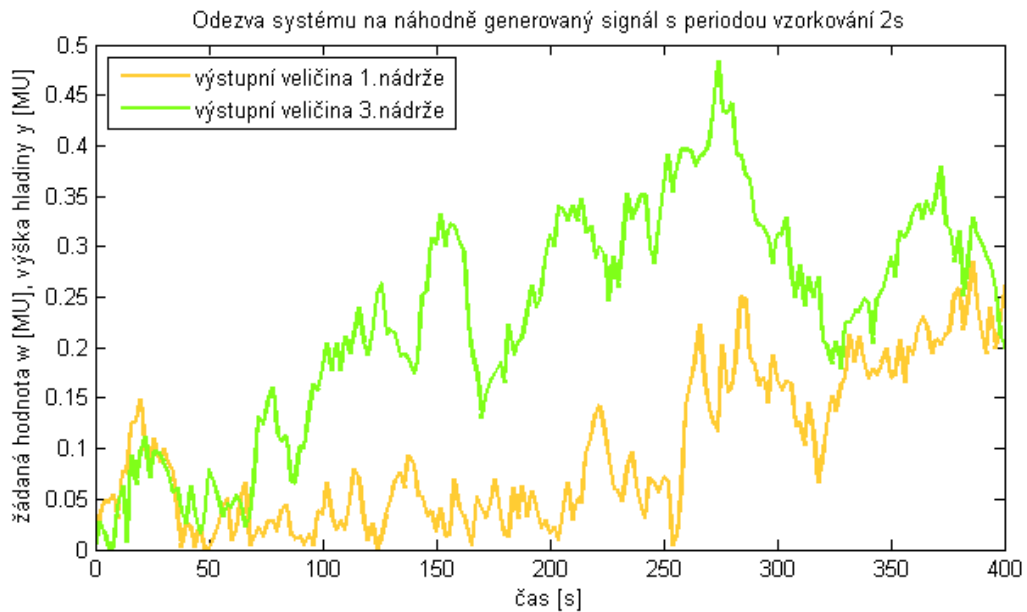
Graf 5 - Nahoře náhodně generovaný signál použitý na vybuzení simulační soustavy pro první čerpadlo, dole signál pro druhé čerpadlo

Pro vyhodnocení odezvy systému a stanovení odhadů parametrů byl vytvořen skript, který data vyhodnotí Metodou nejmenších čtverců. Ta je odvozena v kapitole 2.3. Výstupem tohoto m-filu jsou dva vektory, které představují odhady parametrů.

Vypočítané parametry pro regulaci pomocí metody nejmenších čtverců s periodou vzorkování 2s jsou:

$$A = [-1,8866 \quad 0,8874 \quad -0,1153 \quad 0,1143 \quad -0,0055 \quad 0,0054 \quad -1,9539 \quad 0,9537]$$

$$B = [0,0129 \quad -0,0116 \quad 0 \quad -0,0015 \quad 0 \quad -0,0001 \quad 0,0129 \quad -0,0124]$$



Graf 6 – Odezva simulačního systému na generovaný signál obou čerpadel

Vzhledem k tomu, že nebylo předem jasné, jak rychle dokáže reálná soustava zareagovat na náhodný signál, byla identifikace simulována i pro další periody vzorkování, kterými jsou:  $T_2 = 0,1s$ ,  $T_3 = 1s$ ,  $T_4 = 5s$  a  $T_5 = 10s$ .

### 5.3 Návrh a implementace prediktivního regulátoru

Regulátor byl navrhnout na zjednodušeném vstupně-výstupním modelu.

#### 5.3.1 Výpočet predikcí

Nejdůležitější částí prediktivního řízení je výpočet predikcí při libovolných prognózách a horizontech. Při návrhu těchto predikcí bylo vycházeno z modelu CARIMA.

$$\begin{aligned}
 y_1(k+1) = & (1 - a_1)y_1(k) + (a_1 - a_2)y_1(k-1) + a_2y_1(k-2) - a_3y_2(k) \\
 & + (a_3 - a_4)y_2(k-1) + a_4y_2(k-2) + b_1\Delta u_1(k) + b_2\Delta u_1(k-1) \\
 & + b_3\Delta u_2(k) + b_4\Delta u_2(k-1)
 \end{aligned} \quad (45)$$

$$\begin{aligned}
 y_2(k+1) = & (1 - a_7)y_2(k) + (a_7 - a_8)y_2(k-1) + a_8y_2(k-2) - a_5y_1(k) \\
 & + (a_5 - a_6)y_1(k-1) + a_6y_1(k-2) + b_5\Delta u_1(k) + b_6\Delta u_1(k-1) \\
 & + b_7\Delta u_2(k) + b_8\Delta u_2(k-1)
 \end{aligned} \quad (46)$$

Maticový zápis rovnic (45) a (46) lze ztvárnit:

$$y(k+1) = A_1y(k) + A_2(k-1) + A_3(k-2) + B_1\Delta u(k) + B_2\Delta u(k-1) \quad (47)$$

Kde jednotlivé matice představují:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 - a_1 & -a_3 \\ -a_5 & 1 - a_7 \end{bmatrix}; \quad A_2 = \begin{bmatrix} a_1 - a_2 & a_3 - a_4 \\ a_5 - a_6 & a_7 - a_8 \end{bmatrix}; \quad A_3 = \begin{bmatrix} a_2 & a_4 \\ a_6 & a_8 \end{bmatrix} \quad (48)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} b_1 & b_3 \\ b_5 & b_7 \end{bmatrix}; \quad B_2 = \begin{bmatrix} b_2 & b_4 \\ b_6 & b_8 \end{bmatrix}$$

Dle uvedené rovnice (47) je zřejmé, že je potřeba vypočítat první tři kroky predikce, aby mohly být využity na pozdější predikce.

Pro jeden výpočet predikce je nutné znát tři poslední hodnoty.

$$\hat{y}(k+1) = A_1 y(k) + A_2 y(k-1) + A_3 y(k-2) + B_1 \Delta u(k) + B_2 \Delta u(k-1)$$

$$\hat{y}(k+2) = A_1 y(k+1) + A_2 y(k) + A_3 y(k-1) + B_1 \Delta u(k+1) + B_2 \Delta u(k) \quad (49)$$

$$\hat{y}(k+3) = A_1 y(k+2) + A_2 y(k+1) + A_3 y(k) + B_1 \Delta u(k+2) + B_2 \Delta u(k+1)$$

Výpočet predikce je možné rozdělit na rekurze odezvy a matice dynamiky. Vektor odezvy pak může být ve tvaru:

$$y_0 = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \\ p_{31} & p_{32} \\ p_{41} & p_{42} \\ p_{51} & p_{52} \\ p_{61} & p_{62} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_1(k-1) \\ \Delta u_2(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} & q_{15} & q_{16} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} & q_{25} & q_{26} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & q_{34} & q_{35} & q_{36} \\ q_{41} & q_{42} & q_{43} & q_{44} & q_{45} & q_{46} \\ q_{51} & q_{52} & q_{53} & q_{54} & q_{55} & q_{56} \\ q_{61} & q_{62} & q_{63} & q_{64} & q_{65} & q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \\ y_1(k-1) \\ y_2(k-1) \\ y_1(k-2) \\ y_2(k-2) \end{bmatrix} \quad (50)$$

Po přepsání jednotlivých členů do maticového zápisu lze rovnici (47) získat ve tvaru:

$$y_0 = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} \Delta u(k-1) + \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y(k) \\ y(k-1) \\ y(k-2) \end{bmatrix} = P \Delta u(k-1) + Q \begin{bmatrix} y(k) \\ y(k-1) \\ y(k-2) \end{bmatrix} \quad (51)$$

Koeficienty matice  $P$  a  $Q$  pro budoucí predikce se vypočítávají rekurzivně. Na třech předchozích předpovědích je opakovaně vypočítáván další řádek matice  $P$  a  $Q$  následujícím způsobem.

$$P_4 = \begin{bmatrix} p_{71} & p_{72} \\ p_{81} & p_{82} \end{bmatrix} = A_1 P_{31} + A_2 P_{21} + A_3 P_{11} \quad (52)$$

$$Q_{41} = \begin{bmatrix} q_{71} & q_{72} \\ q_{81} & q_{82} \end{bmatrix} = A_1 Q_{31} + A_2 Q_{21} + A_3 Q_{11} \quad (53)$$

$$Q_{42} = \begin{bmatrix} q_{73} & q_{74} \\ q_{83} & q_{84} \end{bmatrix} = A_1 Q_{32} + A_2 Q_{22} + A_3 Q_{12} \quad (54)$$

$$Q_{43} = \begin{bmatrix} q_{75} & q_{76} \\ q_{85} & q_{86} \end{bmatrix} = A_1 Q_{33} + A_2 Q_{23} + A_3 Q_{13} \quad (55)$$

Výpočet rekurze matice  $G$  je podobný. Další prvek v prvním sloupci je opakovaně vypočítáván a zbývající sloupce se posouvají. Tento postup se provádí opakovaně, dokud

se nedosáhne zvoleného predikčního horizontu. Jestliže je řídicí horizont nižší než predikční horizont, sníží se počet sloupců v matici.

$$\begin{aligned}
 G\Delta u &= \begin{bmatrix} g(1,1) & g(1,2) & 0 & 0 \\ g(2,1) & g(2,2) & 0 & 0 \\ g(3,1) & g(3,2) & g(1,1) & g(1,2) \\ g(4,1) & g(4,2) & g(2,1) & g(2,2) \\ g(5,1) & g(5,2) & g(3,1) & g(3,2) \\ g(6,1) & g(6,2) & g(4,1) & g(4,2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_1(k) \\ \Delta u_2(k) \\ \Delta u_1(k+1) \\ \Delta u_2(k+1) \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} G(1,1) & 0 \\ G(2,1) & G(1,1) \\ G(3,1) & G(2,1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \Delta u(k+1) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{56}$$

$$G_{41} = \begin{bmatrix} g_{71} & g_{72} \\ g_{81} & g_{82} \end{bmatrix} = A_1 G_{31} + A_2 G_{21} + A_3 G_{11} \tag{57}$$

V podobě kompaktní matice lze predikce zapsat jako:

$$\hat{y}(k+j) = G\Delta u(k+j-1) + P\Delta u(k-1) \tag{58}$$

### 5.3.2 Stanovení omezení

Omezení, která jsou do modelu zahrnuta, představují fyzická omezení soustavy. Jedná se především o omezení akčního zásahu, neboť čerpadlo pracuje v rozmezí -10V do 10V, jak je popsáno v Kapitole 1.

Formy matic pro libovolné řídicí horizonty mohou být vyjádřeny následovně:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 1 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & \dots & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ -1 & 0 & -1 & 0 & \dots & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & \dots & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_1(k) \\ \Delta u_2(k) \\ \Delta u_1(k+1) \\ \Delta u_2(k+2) \\ \vdots \\ \Delta u_1(k+N_u) \\ \Delta u_2(k+N_u) \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} u_{min} - \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(k-1) \\ u_2(k-1) \end{bmatrix} \tag{59}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 1 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & \dots & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ -1 & 0 & -1 & 0 & \dots & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & \dots & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_1(k) \\ \Delta u_2(k) \\ \Delta u_1(k+1) \\ \Delta u_2(k+2) \\ \vdots \\ \Delta u_1(k+N_u) \\ \Delta u_2(k+N_u) \end{bmatrix} \geq - \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} u_{max} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(k-1) \\ u_2(k-1) \end{bmatrix}$$

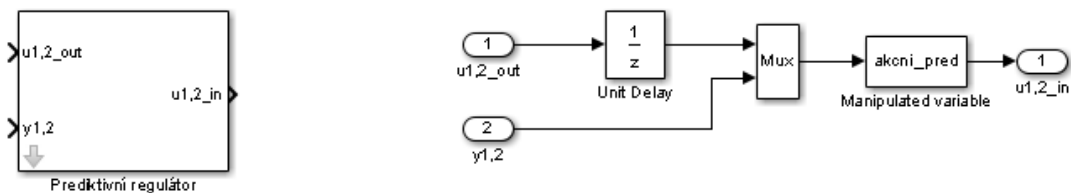
### 5.3.3 Implementace regulátoru

Z odvozených rovnic v kapitole 5.3.1 a 5.3.2 byla sestavena S-funkce pro výpočet predikcí. Problém optimalizace je pak řešen numericky pomocí kvadratického programování, na které byla využita funkce *Quadprog*.

Výpočet ve funkčním bloku se opakuje v každé periodě vzorkování, kterou si uživatel zvolí. První prvek vypočítaného výsledného vektoru se potom použije jako přírůstek akční veličiny.

V samotném schématu určeném pro regulaci reprezentuje regulátor jeden funkční blok – maska, do kterého lze uživatelem zadat 12 vstupních hodnot, které jsou potřebné pro výpočet predikce. Jsou to parametry A a B, minimální, maximální predikční horizont, řídicí horizont, váhový faktor  $\lambda$ , sekvence referenčního signálu a odpovídající časová sekvence pro první a druhou výslednou veličinu, omezující podmínky ve tvaru  $[u_{1min} \ u_{2min} \ u_{1max} \ u_{2max}]$  a jako poslední zvolená perioda vzorkování.

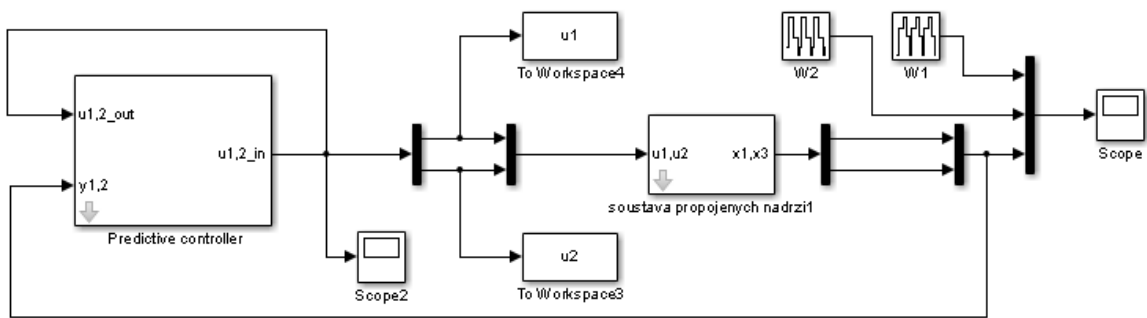
Do bloku pak dále vstupují zpět hodnoty vypočítaných akčních zásahů a výsledná veličina, kterou je zajišťována zpětná vazba systému.



Obrázek 8 – nalevo funkční blok prediktivního regulátoru, napravo schéma regulátoru pod maskou

## 5.4 Simulace regulačního pochodu s pevně nastavenými parametry

Pro regulaci s pevně nastavenými parametry byly využity nejen parametry získané při zidentifikování systému při periodě vzorkování  $T = 2s$ , ale regulace byla také vyzkoušena pro jiné vzorkovací periody, které jsou uvedeny v kapitole 6.2.2 a k tomu příslušné parametry regulace. Níže zobrazené výsledky jsou opět uvedeny jen pro vzorkování s periodou  $T$ .



Obrázek 9 – Simulační schéma pro regulaci s pevně nastavenými parametry

Parametry simulační soustavy jsou shodné s nastavením při modelování statické charakteristiky a identifikace soustavy. Parametry regulace jsou uvedeny v kapitole 6.2.2, kde byly zidentifikovány.

Minimální horizont je nastaven na hodnotu 1, maximální a řídicí horizont je shodně nastaven na hodnotu 20. Váhový koeficient  $\lambda$  je nastaven na hodnotu 0,1.

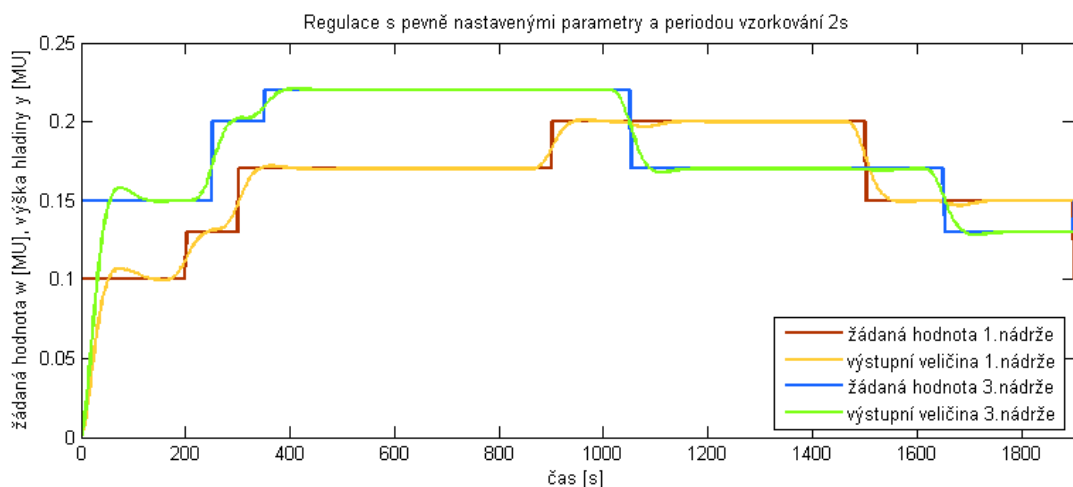
Žádaná hodnota pro obě výšky hladiny byla zadána v podobě skokových změn, neboť ty se v praxi vyskytují nejčastěji.

Pro první nádrž byla žádaná hodnota zadána v podobě:

$$w_1 = [0,1 \ 0,13 \ 0,17 \ 0,2 \ 0,15]$$

Referenční hodnota výšky hladiny poslední nádrže je pak zadána ve skokových změnách:

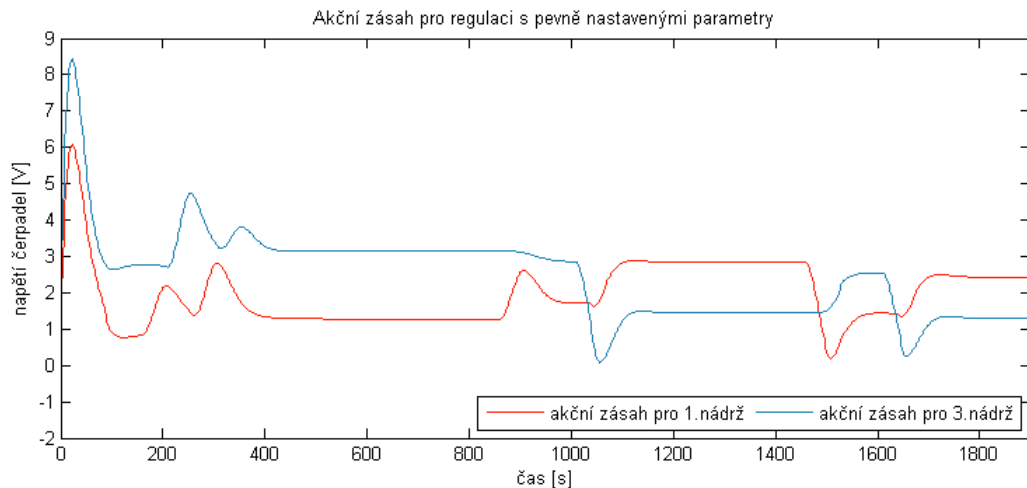
$$w_2 = [0,15 \ 0,2 \ 0,22 \ 0,17 \ 0,13]$$



Graf 7 – Simulace regulace s pevně nastavenými parametry a periodou vzorkování 2s

Výška hladiny v první nádrži se ustálila přibližně za 136s po začátku regulace. V poslední nádrži za 128s. Akční zásah dosahuje maximální hodnoty při náběhu výstupní veličiny. Pro první čerpadlo  $U_{1max} = 6,08 V$  a pro druhé čerpadlo je hodnota  $U_{2max} = 8,43 V$ . Při skokových změnách se výšky hladiny ustálily na žádané hodnotě do 106s.

Akční zásah pro regulaci na grafu 7 lze pozorovat na grafu 8.



Graf 8 – Akční zásah pro simulaci regulace s pevně nastavenými parametry a periodou vzorkování 2s

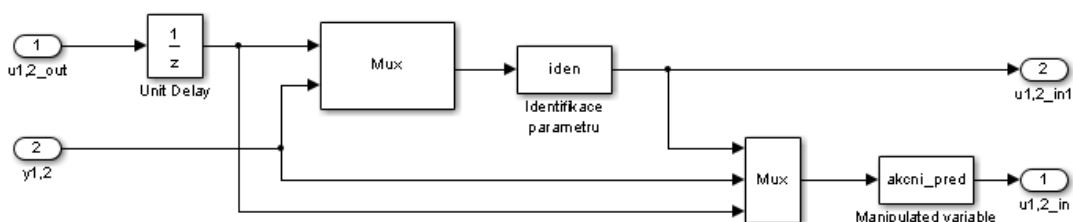
## 5.5 Simulace regulačního pochodu s průběžnou identifikací

Pro regulační pochod s průběžnou identifikací byl do modelu regulátoru implementován navíc blok, který průběžnou identifikaci zajišťuje. RMNČ, která byla pro identifikaci použita, je odvozena v kapitole 2.4.

Pro průběžnou identifikaci byly počáteční parametry zvoleny následujícím způsobem:

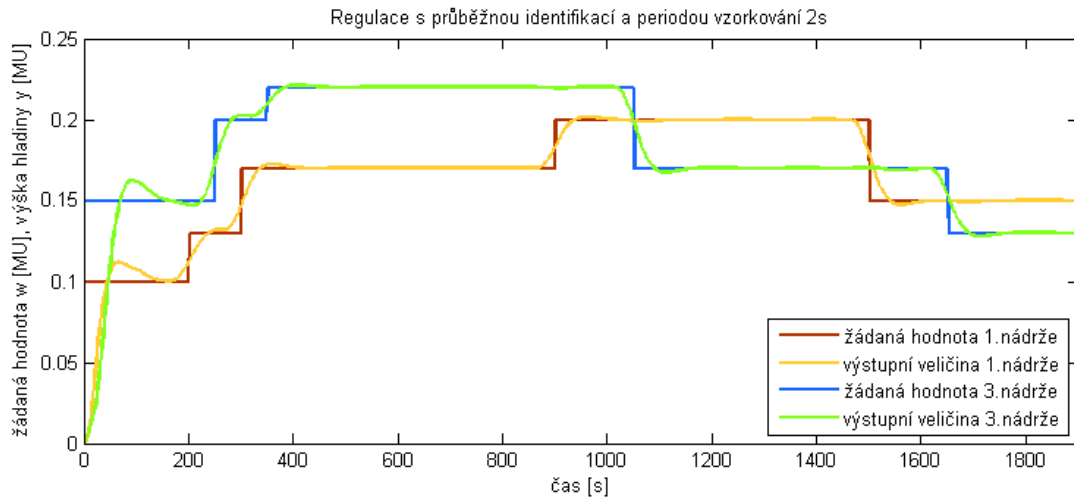
$$A = [0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8]$$

$$B = [0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8]$$

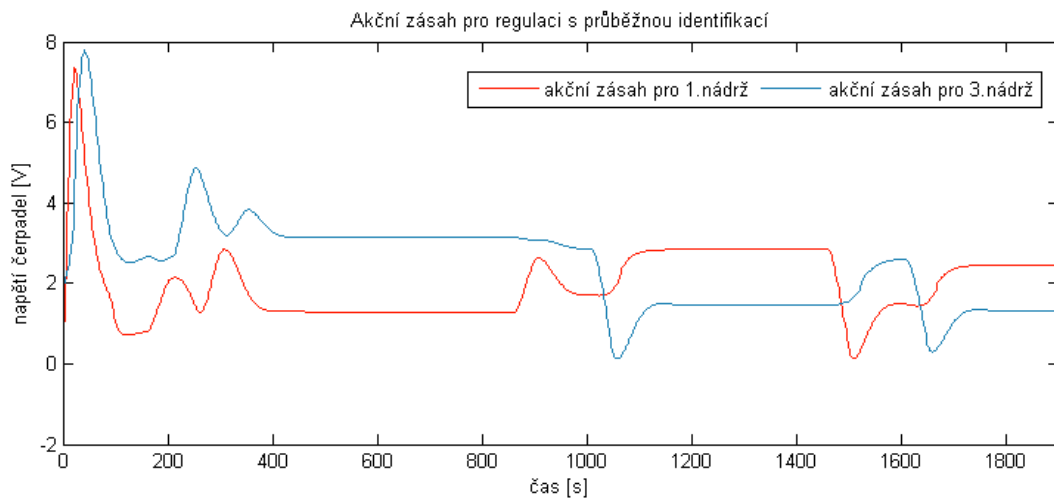


Obrázek 10 – Schéma prediktivního regulátoru s průběžnou identifikací

Nastavení horizontů a referenčních hodnot je shodné jako u regulace s pevně nastavenými parametry. Stejně tak i nastavení parametrů simulačního schéma modelu. Perioda vzorkování zůstala 2s pro možnost srovnání obou regulací.



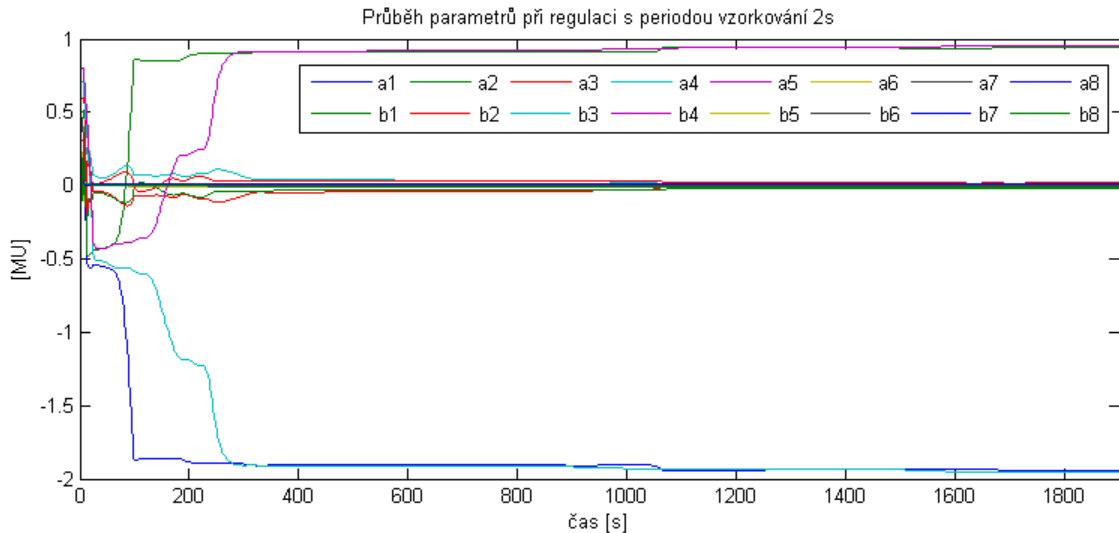
Graf 9 – Simulace regulace s průběžnou identifikací a periodou vzorkování 2s



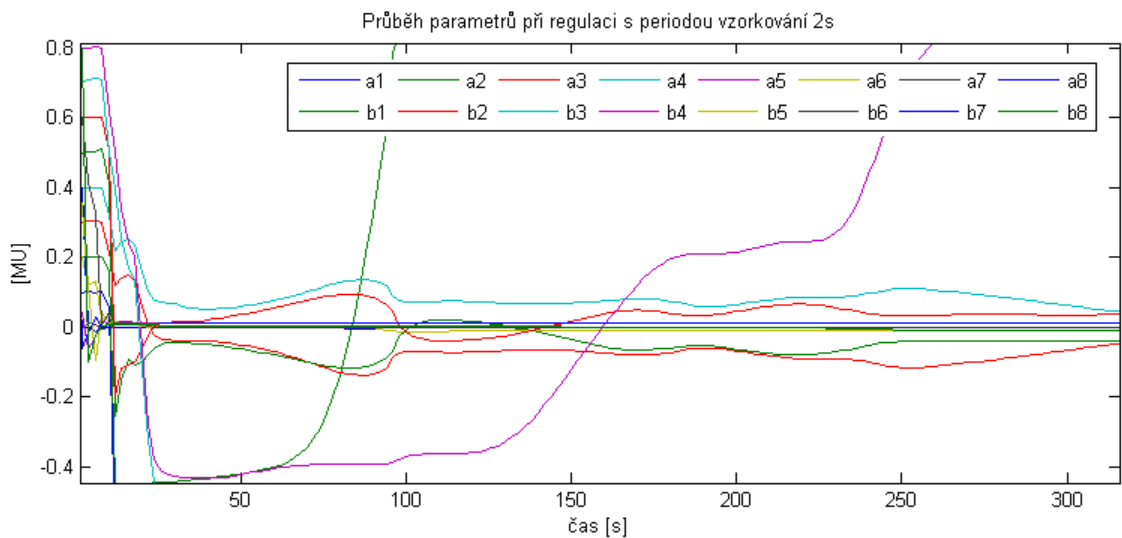
Graf 10 - Akční zásah pro simulaci regulace s průběžnou identifikací a periodou vzorkování 2s

Výška hladiny v první nádrži se ustálila přibližně za 158s po začátku regulace. V poslední nádrži za 170s. Akční zásah dosahuje maximální hodnoty při náběhu výstupní veličiny. Pro první čerpadlo  $U_{1\max} = 7,342\text{ V}$  a pro druhé čerpadlo je hodnota  $U_{2\max} = 7,781\text{ V}$ . Při skokových změnách se výšky hladiny ustálily na žádané hodnotě do 120s.

Rekurzivně se měnící parametry regulace lze pozorovat na grafu 11. Na tomto grafu lze vidět celkový náhled na změny parametrů po celou dobu regulace. Jelikož se ale změny nejvíce projevují do času 350s, kde dochází k největším skokovým změnám žádané hodnoty, je zde uveden i graf 12, na kterém jsou tyto změny detailněji zachyceny.



Graf 11 – Průběh parametrů při simulaci regulace s periodou vzorkování 2s



Graf 12 – Podrobnější náhled na průběh parametrů při simulaci regulace s periodou vzorkování 2s

## 6 ŘÍZENÍ REÁLNÉ SOUSTAVY

Pro řízení reálné soustavy bylo využito již sestavené schéma, které obsahovalo všechny potřebné vstupy i výstupy. Z tohoto schéma byly vybrány pouze ty komunikační bloky, které byly pro dané měření potřebné. Celkové schéma je vyobrazeno v příloze P III. Měření probíhá v reálném čase, k čemuž je využit Real Time Toolbox.

Vstupní napětí čerpadel o intervalu od -10V do 10V (více v kapitole 1) Matlab přepočítává na Matlab Unit, tedy na rozsah -1MU a 1MU. Ve všech vyobrazených grafech je ale tato hodnota přepočítána zpět na původní rozsah čerpadla, tj. -10V až 10V.

### 6.1 Kalibrace měřící soustavy

Výška hladiny vody se měří pomocí tlakových senzorů s analogovými napěťovými výstupy. V první části měření na reálné soustavě tedy bylo nutné provést kalibraci těchto měřících senzorů.

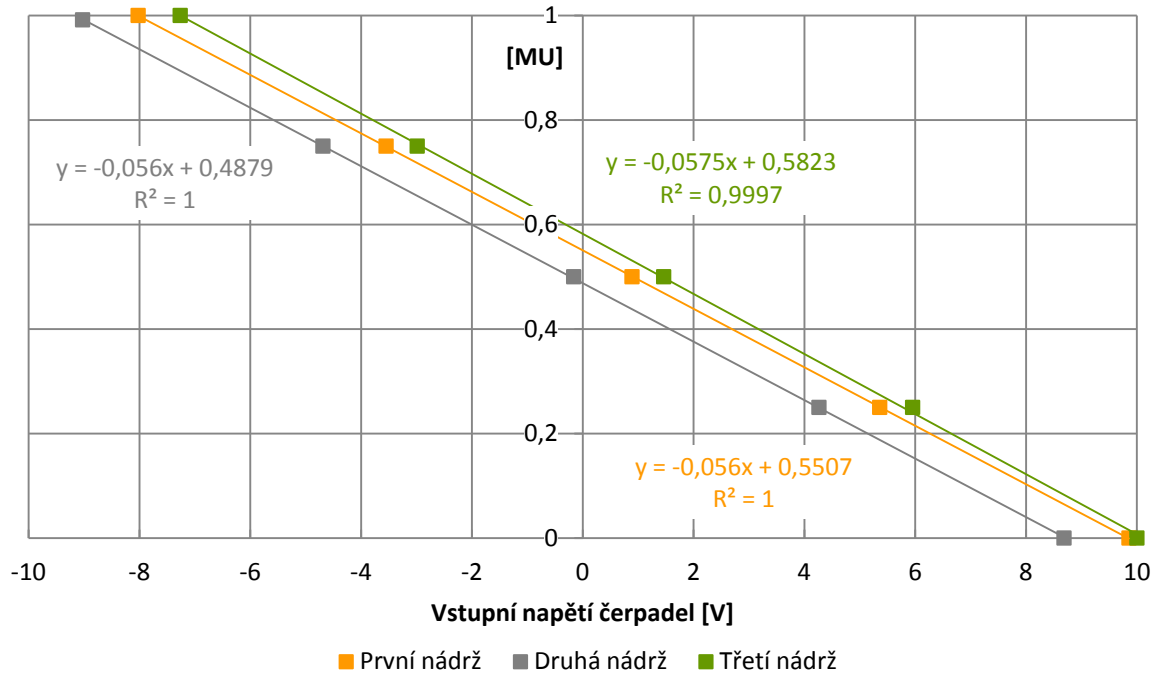
Všechny signály, při kterých je využíván *Real Time Toolbox*, jsou normalizovány na MATLAB jednotky (dále jen MU) v rozmezí od -1 do 1. Cílem této kalibrace bylo určit přepočet mezi všemi zásobníky a výstupním napětím senzoru tak, aby výsledná hodnota výšky hladiny byla v intervalu  $< 0; 1 >$ .

Pro měření bylo použito schéma v prostředí Matlab/Simulink, které se skládalo ze dvou bloků ovládajících vstupní napětí čerpadel, ze tří bloků přijímající aktuální informaci o stavu výšce hladiny a z bloků, které tyto hodnoty zapisovaly a ukládaly do paměti, jako *Display* a *ToWorkspace*.

Při samotné kalibraci byly nádrže napuštěny na svou maximální hodnotu a poté byla voda ze zásobníků vypouštěna pomocí ventilů vždy na požadovanou výšku. Požadovaná výška byla určena dle milimetrové stupnice, která se nachází na samotných zásobnících. Celkem bylo na každé nádrži stanoveno 5 pracovních bodů pro určení výšky hladiny a pro každou výšku bylo zaznamenáno vždy 100 hodnot. Tyto hodnoty se poté při jejich zpracování průměrovaly.

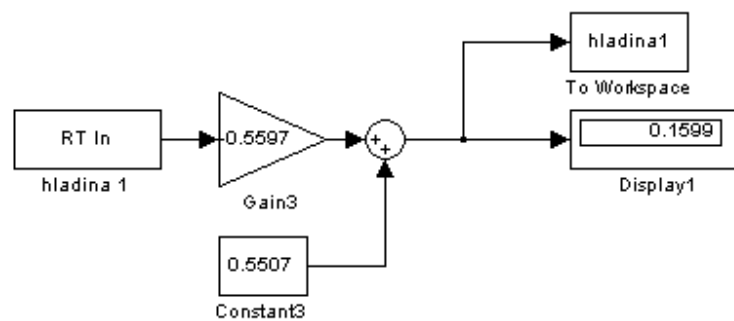
Hodnoty, které představují průměrnou hodnotu pro stanovenou výšku hladiny, byly následně vyneseny do grafu 13, kde byly proloženy lineární regresí. Rovnice regrese pak představuje přepočet pro měřící senzory.

## Kalibrace měřících senzorů



Graf 13 – Kalibrace měřících senzorů

Vypočítané rovnice regrese, které jsou uvedeny v grafu 13, pro jednotlivé výšky hladiny, byly do schématu zakomponovány pomocí bloků konstanty (*Constant*), zesílení (*Gain*) a sumačního členu (*Sum*) jak je znázorněno na Obrázku 11.



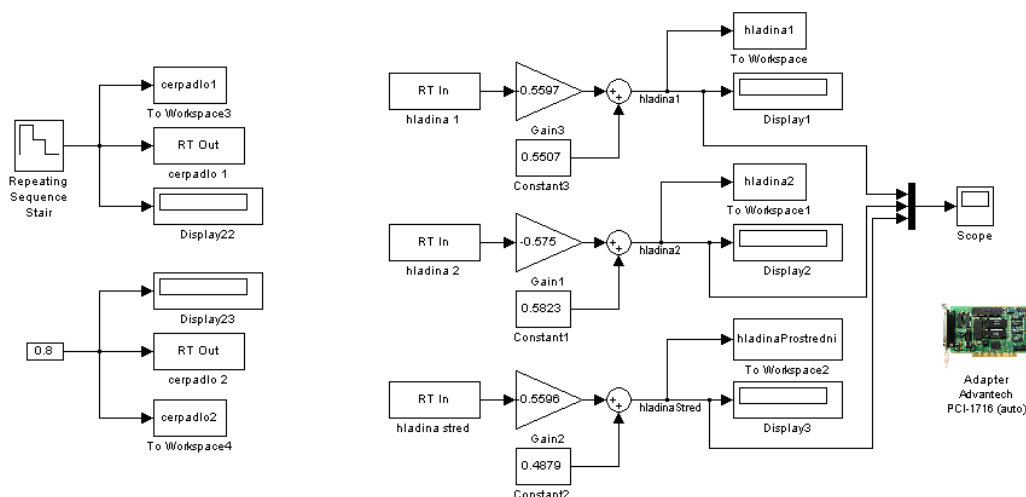
Obrázek 11 – Ukázka zakomponování rovnice regrese do měřícího schéma

## 6.2 Statické a dynamické vlastnosti soustavy

### 6.2.1 Statická charakteristika

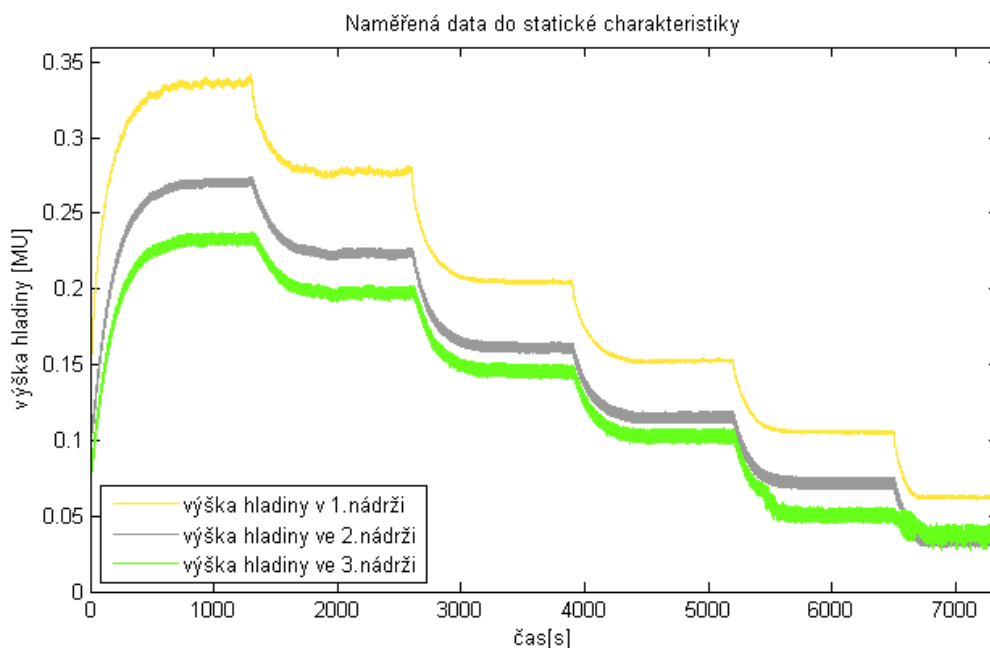
Pro zjištění skutečných vlastností modelu byla proměřena statická charakteristika. Z důvodu časové náročnosti měření této charakteristiky nebyl interval vstupního napětí

rozdělen na 25 hodnot, jako tomu bylo při simulaci charakteristiky, ale byla proměřena po kroku 2V pro obě čerpadla. Z naměřených hodnot byly tedy získány 3 matice (vždy pro každou nádrž) o rozměru (11×11). Pro měření bylo použito schéma na Obrázku 12 a hodnoty byly měněny vždy pro jedno čerpadlo při konstantním nastavení druhého čerpadla.



Obrázek 12 – Schéma pro měření statické charakteristiky

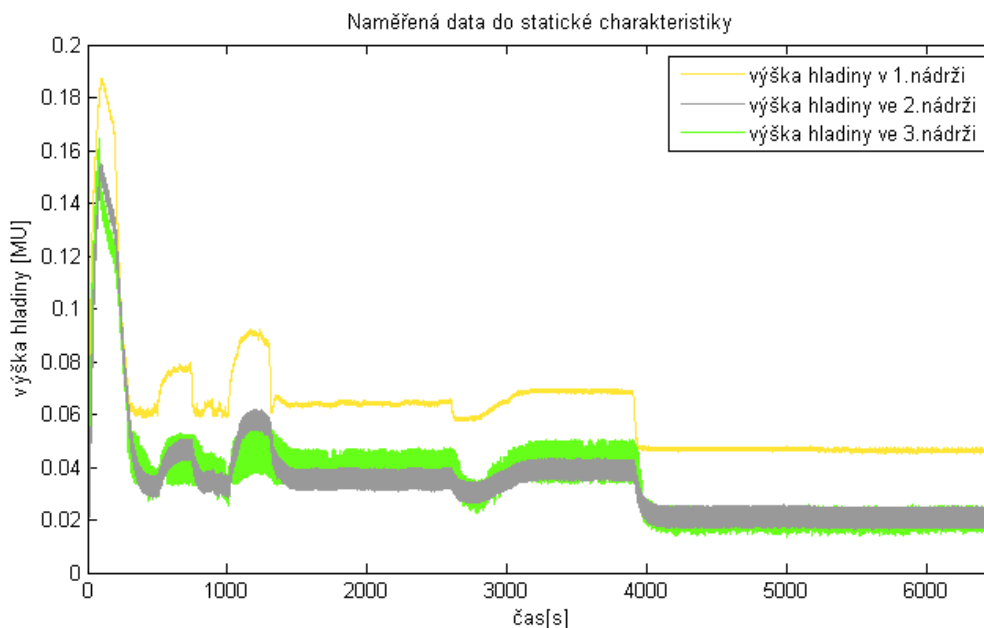
Ukázku naměřených dat statické charakteristiky pro pevné nastavení vstupního napětí druhého čerpadla a měnící se vstupní napětí prvního čerpadla lze pozorovat na grafu 14. Čas na ustálení výšky hladiny při určitém nastavení napětí byl na 1300s.



Graf 14 – Naměřená data do statické charakteristiky při pevném nastavení 2. Čerpadla na hodnotu 2V a měnícím se vstupním napětí 1. Čerpadla od 10V až po 0V při kroku 2V.

Při vyhodnocení naměřených dat bylo po ustálení výstupní hodnoty bráno celkem 250 hodnot, které se zprůměrovaly.

Během měření bylo zřejmé, že pokud se hladina v nádržích dostala pod hodnotu 0,08 MU, bylo měření zatíženo chybami způsobenými bublinkami, které se při tak nízké hladině dostávaly do systému. Vzhledem k tomu, že se jedná o nepředvídatelný jev, není v simulaci nijak zahrnut. Projevené nelinearity systému lze pozorovat na grafu 15.

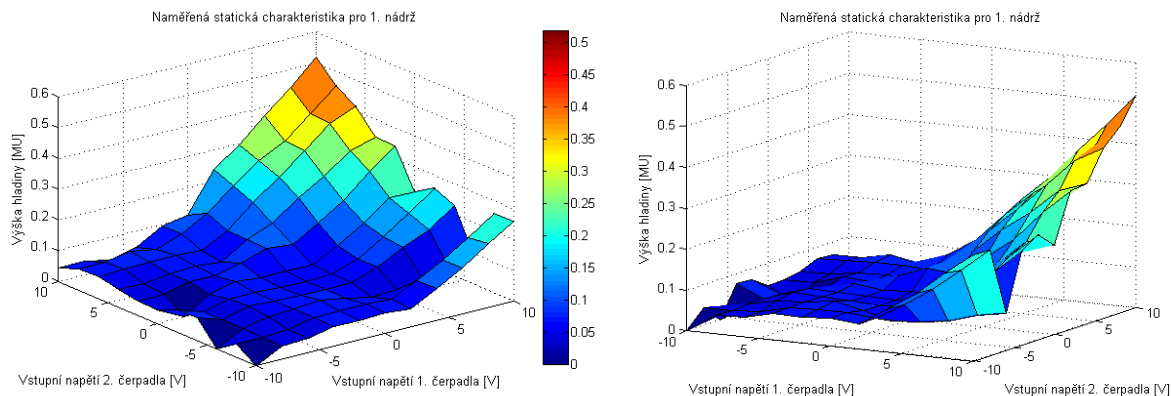


Graf 15 - Naměřená data do statické charakteristiky při pevném nastavení 2. čerpadla na hodnotu 2V a měnícím se vstupním napětí 1. čerpadla od -2V až po -10V při kroku 2V  
Vyhodnocená data pro první a poslední nádrž lze vidět v tabulkách 4 a 5.

Tabulka 4 – Data pro 3D statickou charakteristiku první nádrže

1. nádrž		Vstupní napětí [V] pro 1. čerpadlo										
		-10	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10
Vstupní napětí [V] pro 2. čerpadlo	-10	0,000	0,045	0,048	0,065	0,062	0,069	0,060	0,106	0,150	0,208	0,259
	-8	0,044	0,044	0,049	0,067	0,068	0,070	0,063	0,103	0,147	0,201	0,258
	-6	0,000	0,047	0,062	0,066	0,076	0,060	0,043	0,046	0,056	0,077	0,091
	-4	0,075	0,047	0,070	0,065	0,064	0,060	0,064	0,093	0,133	0,171	0,229
	-2	0,072	0,046	0,067	0,065	0,062	0,060	0,063	0,091	0,141	0,198	0,258
	0	0,046	0,003	0,053	0,073	0,064	0,067	0,064	0,109	0,158	0,221	0,219
	2	0,046	0,047	0,068	0,065	0,087	0,113	0,105	0,153	0,204	0,279	0,339
	4	0,055	0,056	0,065	0,068	0,062	0,113	0,145	0,207	0,257	0,319	0,343
	6	0,072	0,075	0,077	0,079	0,073	0,113	0,185	0,247	0,312	0,378	0,417
	8	0,069	0,069	0,083	0,068	0,099	0,144	0,213	0,272	0,317	0,383	0,456
	10	0,043	0,046	0,026	0,046	0,097	0,109	0,238	0,298	0,372	0,442	0,519

Grafické znázornění statické charakteristiky pro první nádrž je vyobrazeno na grafu 16.



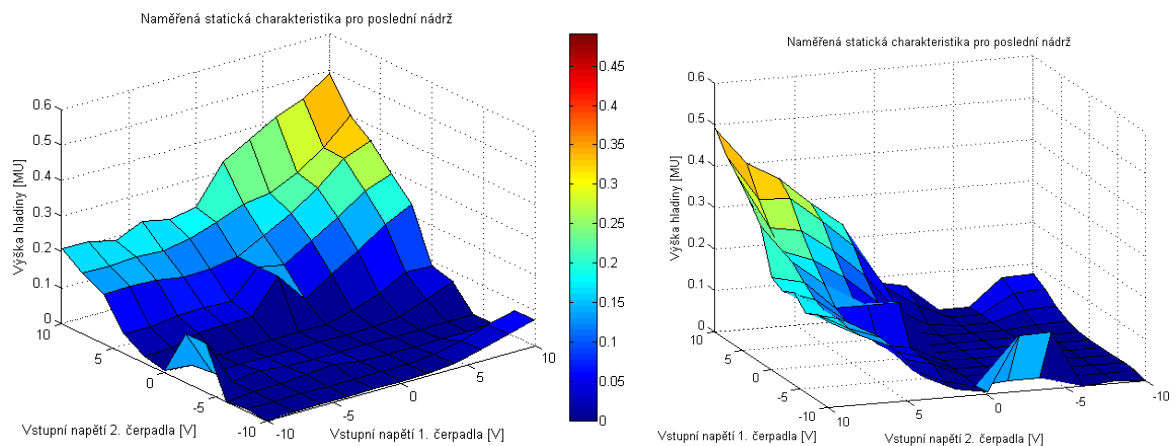
Graf 16 – Naměřená statická charakteristika pro 1. nádrž, nalevo přímý pohled, napravo pohled pravé strany

Při maximálním výkonu obou čerpadel dosahuje výška hladiny v první nádrži hodnoty 0,519 MU. Oproti simulaci jsou zřejmé nelinearity soustavy, které se při měření projevují, jak již bylo zmíněno výše. Pro oblast řízení byla vybrána oblast v intervalu  $\langle 0,1MU; 0,25MU \rangle$ .

Tabulka 5 – Data pro 3D statickou charakteristiku poslední nádrže

3. nádrž		Vstupní napětí [V] pro 1. čerpadlo										
		-10	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10
Vstupní napětí [V] pro 2. čerpadlo	-1	0,000	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,016	0,034	0,056	0,074
	-8	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,013	0,031	0,053	0,072
	-6	0,000	0,007	0,011	0,014	0,020	0,009	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007
	-4	0,138	0,008	0,019	0,011	0,009	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007
	-2	0,136	0,007	0,008	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,015	0,043	0,072
	0	0,007	0,000	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,026	0,054	0,091	0,087
	2	0,020	0,020	0,043	0,043	0,046	0,137	0,050	0,102	0,146	0,198	0,233
	4	0,054	0,053	0,063	0,064	0,059	0,137	0,120	0,167	0,212	0,266	0,291
	6	0,136	0,138	0,134	0,123	0,123	0,137	0,176	0,216	0,267	0,327	0,358
	8	0,168	0,167	0,174	0,167	0,182	0,205	0,236	0,245	0,281	0,331	0,400
	10	0,209	0,207	0,191	0,224	0,207	0,222	0,329	0,369	0,411	0,442	0,491

Grafické znázornění statické charakteristiky pro poslední nádrž je vyobrazeno na grafu 17.



Graf 17 – Statická charakteristika pro poslední nádrž, nalevo přímý pohled, napravo pohled zleva

Maximální výška hladiny, kterou lze dosáhnout při zvolené konfiguraci v poslední nádrži je 0,491 *MU*. Oproti první hladině se nepatrně liší, což může být způsobeno různými regulačními ventily, které jsou na soustavě použity (viz. Kapitola 1.2). Opět jsou zde vidět projevené nelinearity soustavy.

Po vyhodnocení dat byla i pro tuhle nádrž zvolena oblast řízení v rozmezí <0,1*MU*; 0,25*MU*>.

### 6.2.2 Identifikace soustavy

Identifikace na reálné soustavě byla provedena shodně se simulací. Do soustavy byl tedy v podobě akčního zásahu poslán náhodný signál s Gaussovým rozložením. Odezvu na tento signál lze pozorovat v příloženém grafu 19.

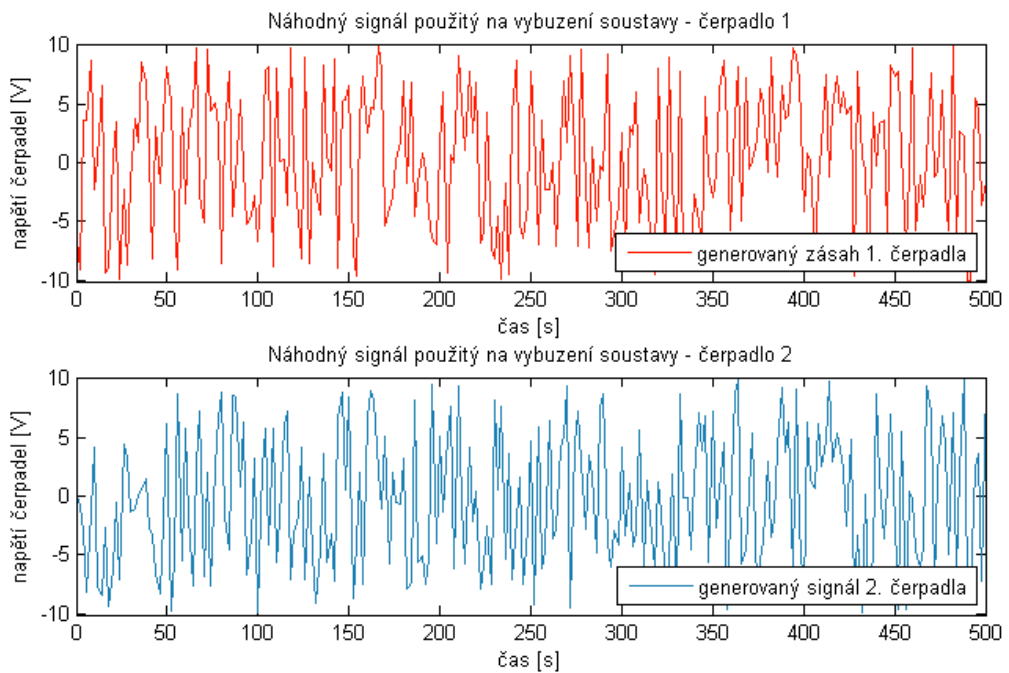
Identifikace byla vyzkoušena i pro jiné periody vzorkování, které jsou uvedeny v kapitole 5.2.2, a to z toho důvodu, aby bylo zjištěno, jak rychle je soustava schopna zareagovat na akční změnu. Perioda vzorkování 2s se jevila jako optimální a nejmenší možná perioda s přípustnou odezvou systému, proto jsou všechny výsledky v této práci vztahovány k této periodě.

Výstupní data z identifikace byla zpracována v totožném skriptu jako u simulace, tedy metodou nejmenších čtverců.

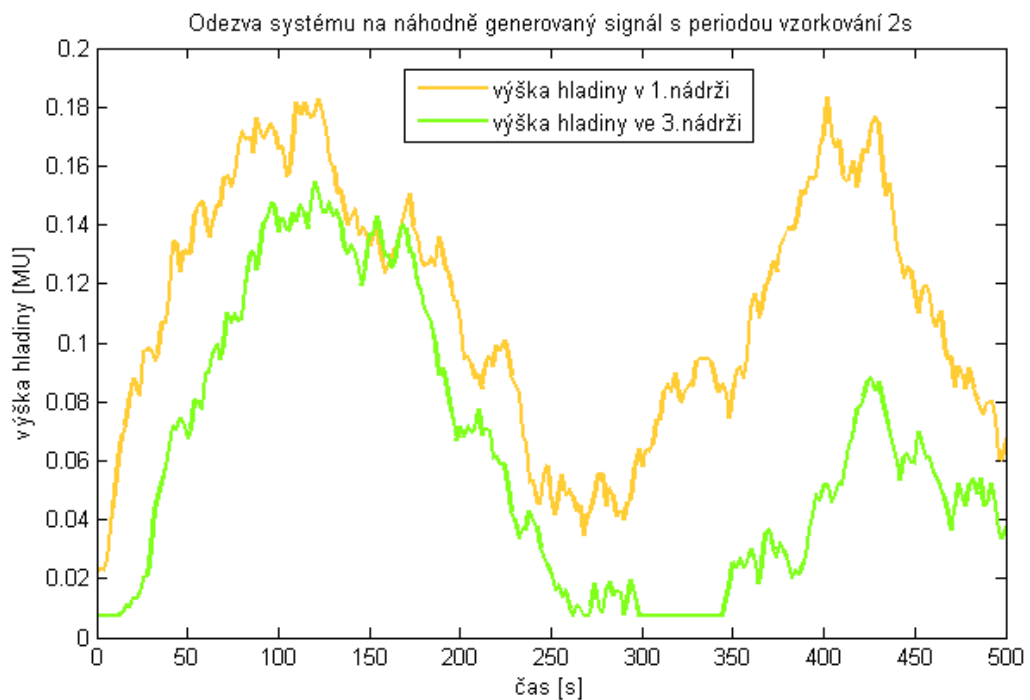
Vypočítané parametry regulace pro periodu vzorkování 2s jsou:

$$A = [-1,0729 \quad 0,0653 \quad -0,0808 \quad 0,1017 \quad -0,0302 \quad 0,0182 \quad -1,1931 \quad 0,2138]$$

$$B = [-0,0001 \quad 0,0072 \quad 0,0000 \quad -0,0001 \quad 0,0002 \quad -0,0000 \quad -0,0001 \quad 0,0072]$$



Graf 18 – Nahoře náhodně generovaný signál použitý na vybuzení soustavy pro první čerpadlo, dole signál pro druhé čerpadlo



Graf 19 – Odezva soustavy na náhodný signál ve formě výšky hladiny v obou nádržích

### 6.3 Regulace s pevně nastavenými parametry

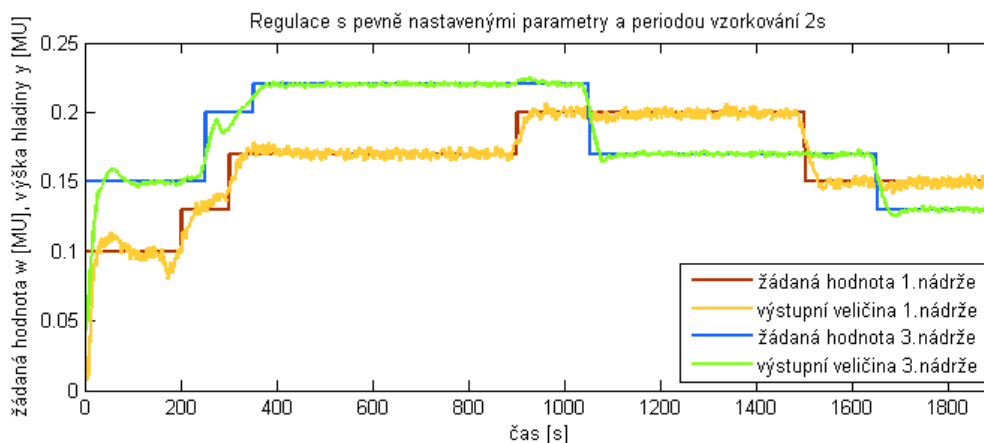
Podle vypočítaných parametrů určených z identifikace soustavy byla provedena regulace.

Minimální horizont je nastaven na hodnotu 4, maximální a řídicí horizont je shodně nastaven na hodnotu 10. Váhový koeficient  $\lambda$  má hodnotu 0,1.

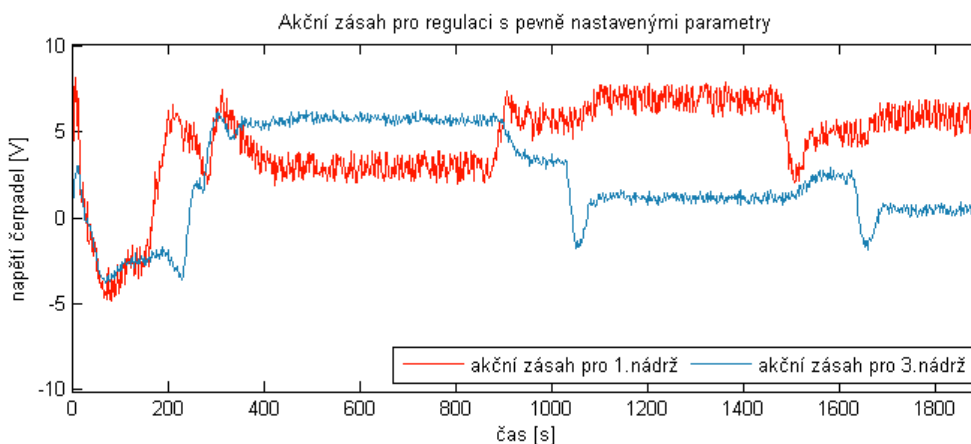
Použité parametry jsou uvedeny v kapitole 6.2.2.

Žádaná hodnota zůstává totožně nastavená jako při simulaci regulačních pochodů, které jsou uvedeny v kapitole 5.4.

Jak je zřejmé na grafu 20, při náběhu se výška hladiny první nádrže ustálila za 88s, výška druhé nádrže se ustálila na žádané hodnotě v čase 92s. Lze si všimnout predikovaných změn akčního zásahu – lze pozorovat změnu tohoto zásahu ještě před samotnou změnou referenční hodnoty. Díky tomu se výstupní veličina ustálila do 55s od každé skokové změny. Akční zásah pro první nádrž dosahuje maximální hodnoty 8,16V a pro poslední nádrž 6,25V.



Graf 20 – Regule s pevně nastavenými parametry a periodou vzorkování 2s

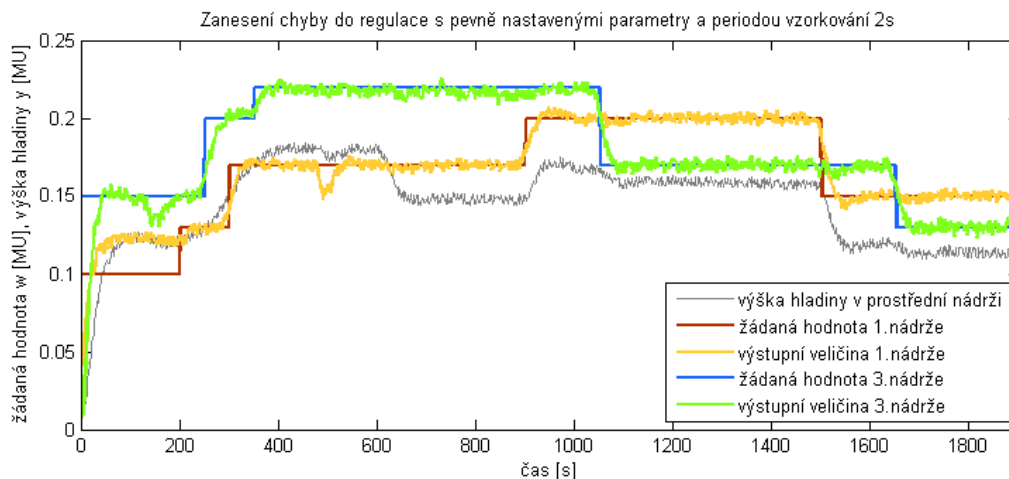


Graf 21 – Akční zásah obou čerpadel pro regulaci s pevně nastavenými parametry a periodou vzorkování 2s

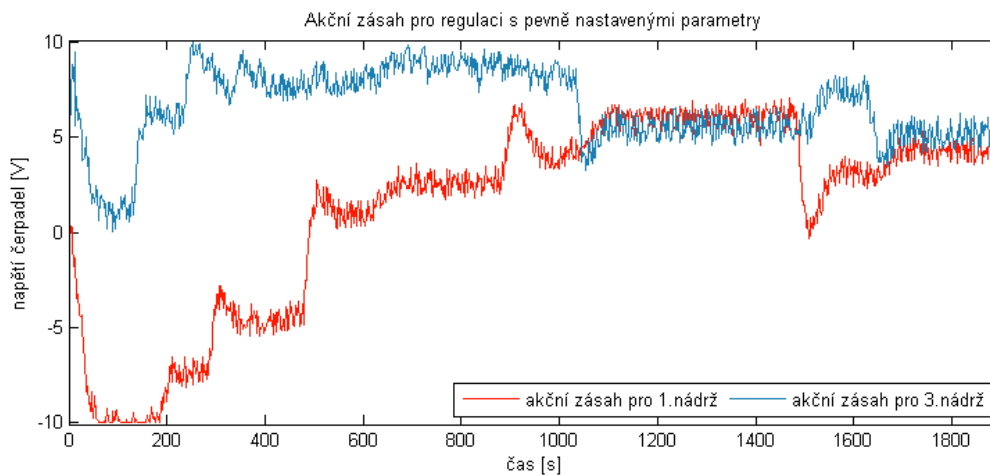
### 6.3.1 Zanesení poruchové veličiny do regulace

Do regulačního pochodu byla zavedena poruchová veličina. V reálném měření tato chyba znamenala otevření ventilu 5 (dle Obrázku 5) který vypouští vodu z prostřední nádrže do akumulární nádrže. Ventil se začal otevírat v čase 600s a 10s na to byl plně otevřen, tedy na hodnotu 100%. Jeho poloha byla takto ponechána až do konce měření.

Regulace byla nastavena s totožnými parametry jako v kapitole 6.3.



Graf 22 - Zanesení poruchové veličiny do regulace s pevně nastavenými parametry a periodou vzorkování 2s



Graf 23 - Akční zásah pro regulační pochod s pevně nastavenými parametry a se zanesenou poruchovou veličinou

Na grafu 22, na kterém je zobrazen regulační pochod, lze pozorovat pokles hladiny v prostřední nádrži, který nastal po otevření ventilu 5. Prediktivní regulátor zareagoval na tuhle změnu navýšením vstupního napětí obou čerpadel o necelý 1V, čímž dokázal

sledované výstupní veličiny, jimiž jsou výšky hladiny v krajních nádržích, udržet na žádaných hodnotách. Akční zásah obou čerpadel lze vidět na grafu 23.

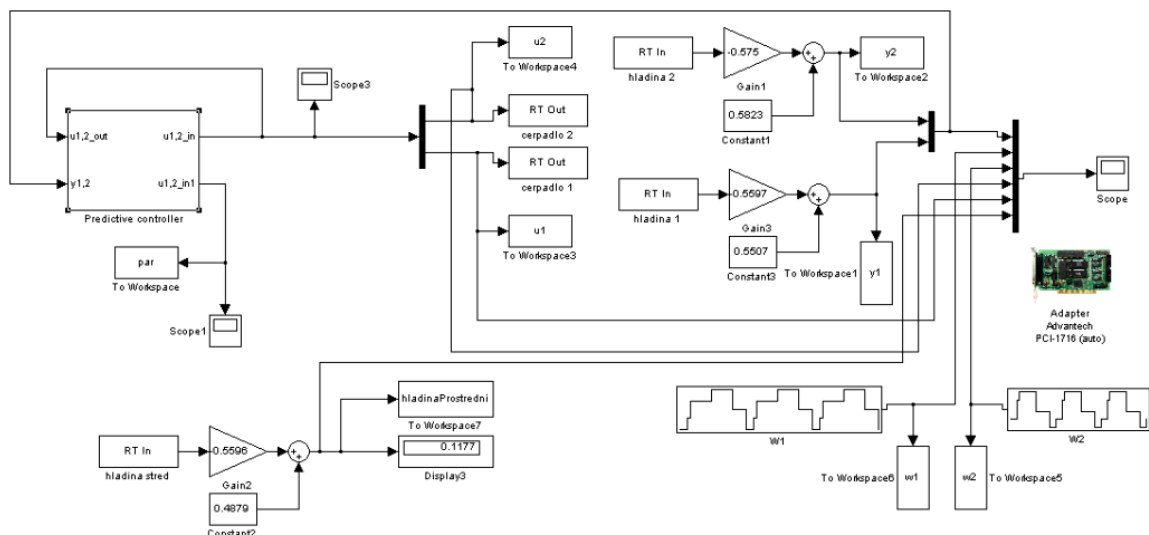
#### 6.4 Regulace s průběžnou identifikací

Regulace s průběžnou identifikací byla na reálné soustavě naměřena opět s totožně nastavenými parametry regulátoru, jako tomu bylo u simulace. Blok s průběžnou identifikací byl ponechán dle simulace s rekurzivní metodou nejmenších čtverců.

Počáteční parametry byly zvoleny následovně:

$$A = [0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8]$$

$$B = [0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8]$$

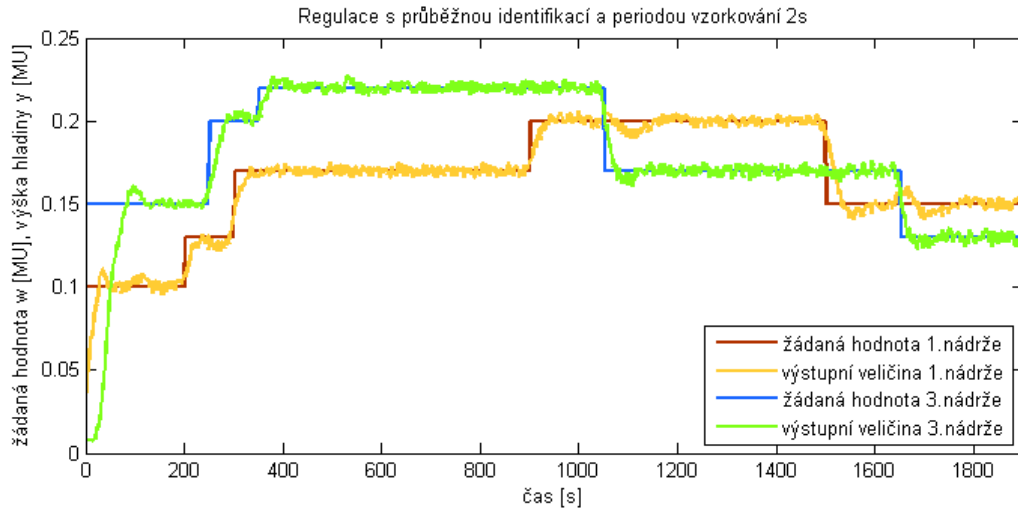


Obrázek 13 – Schéma pro regulaci s průběžnou identifikací na reálné soustavě

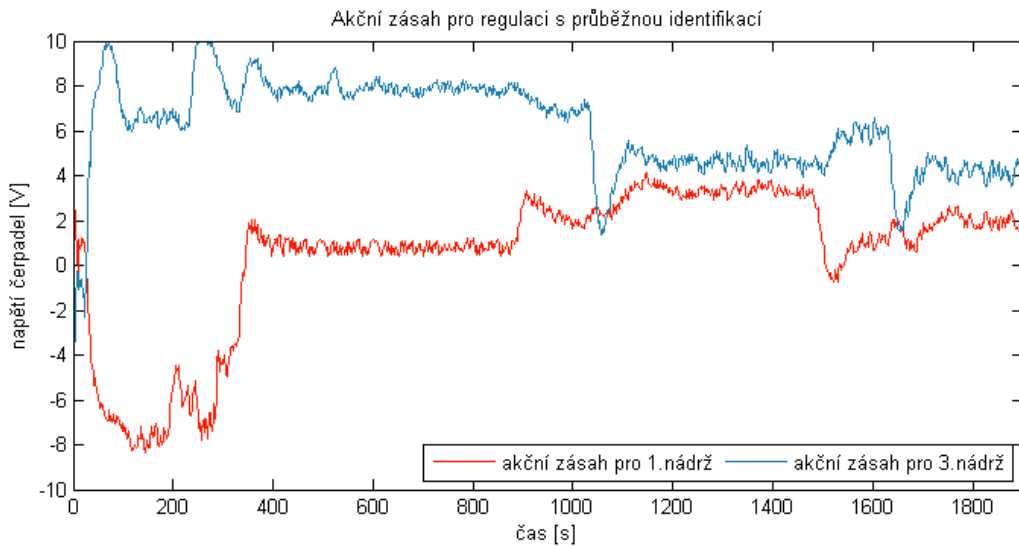
Jak je zřejmé na grafu 24, při náběhu se výška hladiny první nádrže ustálila za 52s, výška druhé nádrže se ustálila na žádané hodnotě v čase 124s. Po každém dalším jednotlivém skoku se výstupní veličiny ustálili do 63 s.

Druhé čerpadlo dosáhlo maximální hodnoty vstupního napětí, tedy 10V, přičemž pro první čerpadlo byla hodnota maximálního napětí v této regulaci 4,1V.

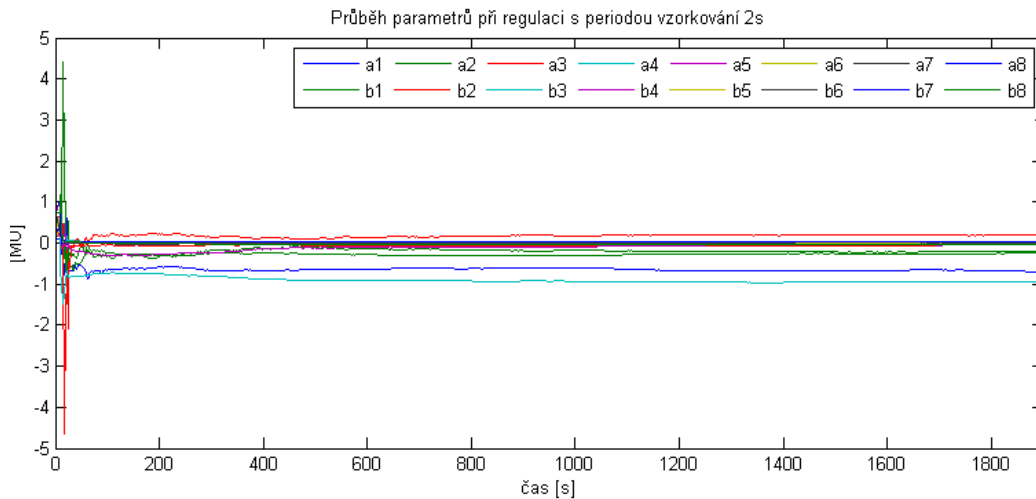
Průběh parametrů při regulaci lze pozorovat na grafu 26, kde jsou vyobrazeny po celou dobu regulace. Je zde patrné, že parametry se měnily hlavně ze začátku regulace, kdy bylo potřeba výšku hladiny dostat z nulové hodnoty až na její požadovanou. Poté k výraznějším změnám nedošlo.



Graf 24 – Regulace s průběžnou identifikací a periodou vzorkování 2s

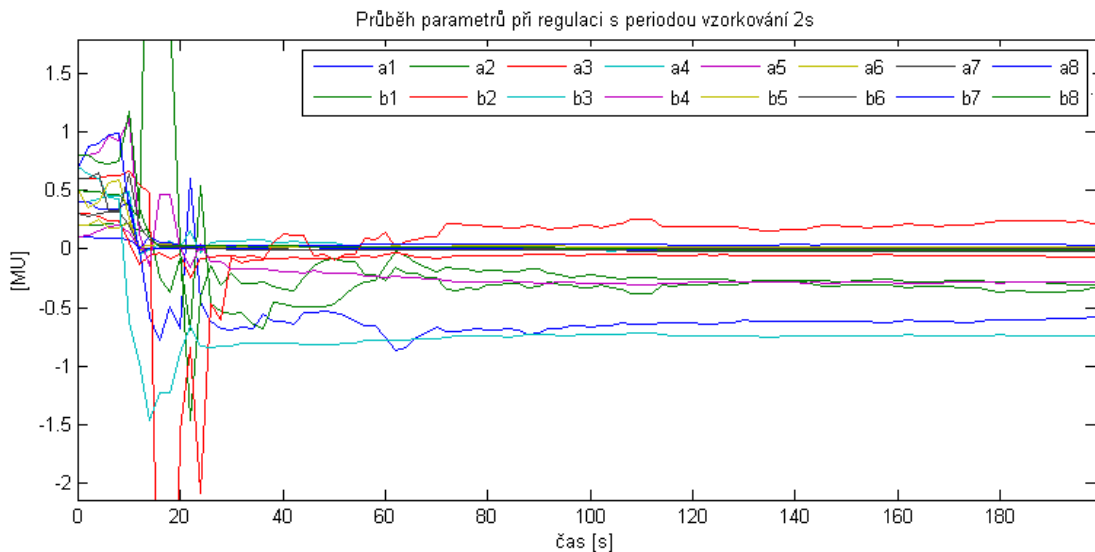


Graf 25 – Akční zásah obou čerpadel pro regulaci s průběžnou identifikací a periodou vzorkování 2s



Graf 26 – Měnící se parametry po čas regulačního pochodu s periodou vzorkování 2s

Na grafu 27 lze pozorovat detailní výřez z průběhu měnicích se parametrů na začátku regulačního pochodu.

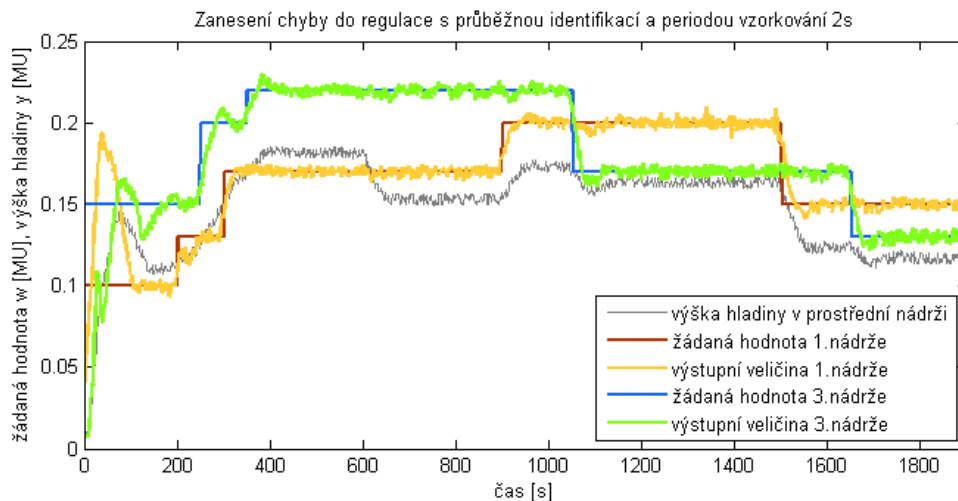


Graf 27 – Detailní zobrazení měnicích se parametrů při regulačním pochodu

#### 6.4.1 Zanesení poruchové veličiny do regulačního pochodu

Do regulačního pochodu s průběžnou identifikací byla taktéž, jako v kapitole 6.3.1, zavedena poruchová veličina v podobě otevření ventilu 5.

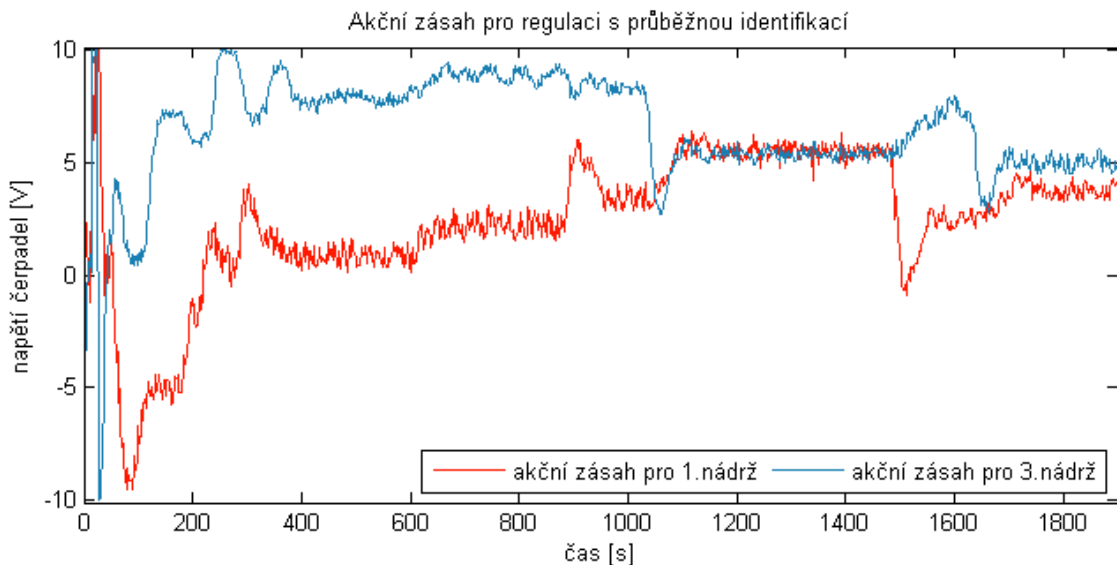
Všechny parametry regulace byly opět shodně nastaveny s regulací v kapitole 6.4.



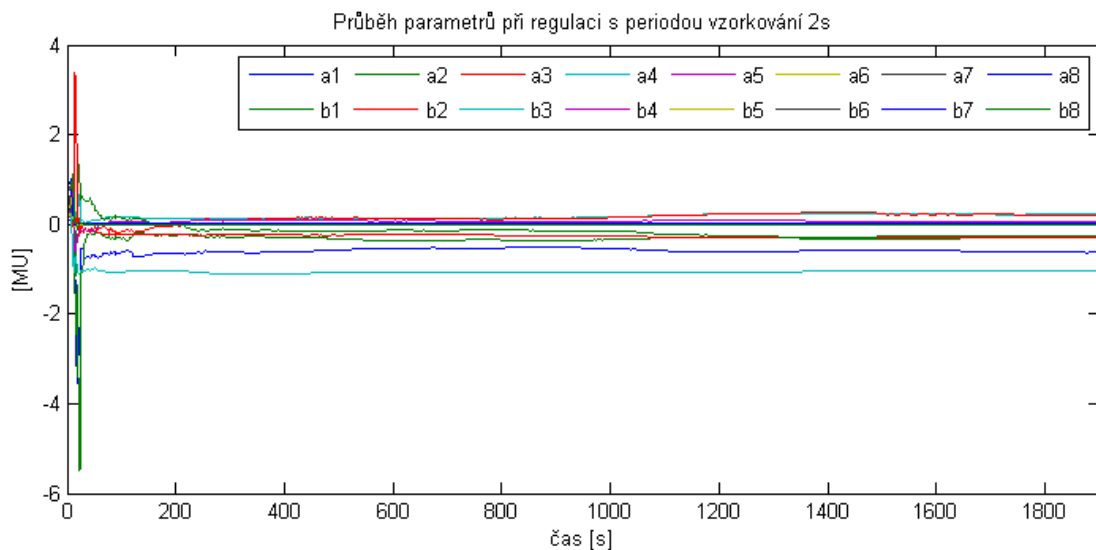
Graf 28 – Zanesení poruchové veličiny do regulace s průběžnou identifikací a periodou vzorkování 2s

Na grafu 28 lze taktéž pozorovat pokles výšky hladiny v prostřední nádrži, který nastal v čase 604s díky otevření ventilu č. 5. I u průběžné identifikace prediktivní regulátor zareagoval na tuhle změnu navýšením vstupního napětí obou čerpadel o necelý 1V a taktéž dokázal udržet výstupní veličiny na požadovaných hodnotách.

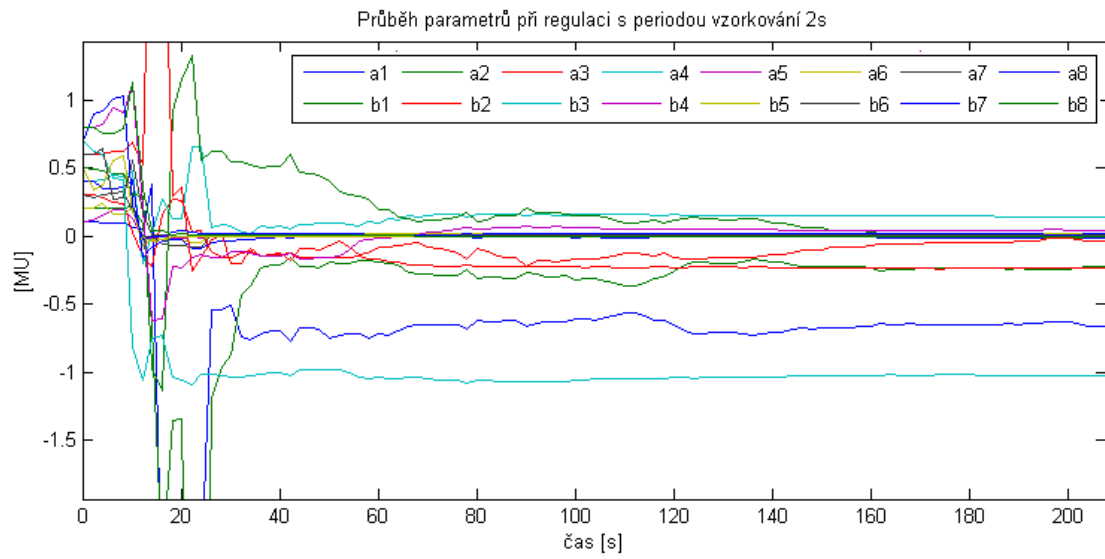
Parametry regulace nejsou díky následkům této poruchy více ovlivněny, jak ukazuje graf 30. Vzhledem k širokému intervalu parametrů na začátku regulace je zobrazen detail po dobu 200s na grafu 31.



Graf 29 – Akční zásah pro regulační pochod se zanesenou poruchovou veličinou



Graf 30 – Průběh parametry při regulaci se zavedenou poruchovou veličinou a periodou vzorkování 2s



Graf 31 – Detailní náhled na parametry při regulaci se zavedenou poruchovou veličinou

## 7 SROVNÁNÍ REGULAČNÍCH POCHODŮ

V této kapitole budou srovnány jednotlivé regulační pochody na reálné soustavě, tedy regulace s pevně nastavenými parametry a s průběžnou identifikací.

Regulace na reálné soustavě je vyhodnocena v kapitole 7.1, simulované regulační pochody jsou navzájem porovnány v kapitole 7.2.

### 7.1 Regulace na reálném modelu

Soustava je nelineární a má v různých pracovních bodech různé parametry, ovšem tyto parametry se neliší tolik, jako u jiných procesů (např. proces neutralizace). Proto rozdíly v kvalitě regulace s pevně nastavenými parametry a s průběžnou identifikací nejsou příliš patrné. Použití průběžné identifikace se tedy pro tento konkrétní proces integračního charakteru jeví jako nadbytečné, neboť vykazuje větší nároky na výpočetní techniku. Tento postup je však využitelný u jiných nelineárních procesů, kde by bylo tohle řízení nezbytné.

Pro lepší názornost byla data jednotlivých regulací, které jsou vyobrazeny v kapitolách 6.3 a 6.4, porovnána pomocí kvadratických kritérií na celém průběhu.

U kritéria se závislostí na regulační odchylce je důležité, aby jeho hodnota byla co možná nejnižší, neboť čím je tato regulační plocha menší, tím je kvalita regulace vyšší. Z vyhodnocení v tabulce 6 je zřejmé, že u regulace s průběžnou identifikací je pro první výšku hladiny dosaženo kvalitnější regulace, u druhé výšky hladiny je ale naopak kvalitnější regulace s pevně nastavenými parametry. Všechny tyto hodnoty se ovšem pohybují ve velmi malém rozmezí, jak zde již bylo zmíněno.

Tabulka 6 – Vyhodnocení kvality regulace sumačním kvadratickým kritériem se závislostí na regulační odchylce

Typ regulace:	$S_{y1}$ [-]	$S_{y2}$ [-]	$y_{1\_min}$ [MU]	$y_{1\_max}$ [MU]	$y_{2\_min}$ [MU]	$y_{2\_max}$ [MU]
S pevně nastavenými parametry	$8,79 \cdot 10^{-5}$	$9,24 \cdot 10^{-5}$	0,0073	0,2068	0,0425	0,2252
S pevně nastavenými parametry zatížené poruchou	$8,45 \cdot 10^{-5}$	$1,82 \cdot 10^{-4}$	0,0415	0,2072	0,0073	0,2251
S průběžnou identifikací	$5,01 \cdot 10^{-5}$	$4,52 \cdot 10^{-4}$	0,0370	0,2060	0,0073	0,2271
S průběžnou identifikací zatížené poruchou	$2,04 \cdot 10^{-4}$	$2,97 \cdot 10^{-4}$	0,0415	0,2094	0,0073	0,2299

Při vyhodnocení kvality regulace pomocí kvadratického kritéria se závislostí na sumě přírůstků akční veličiny, jehož hodnoty jsou vyobrazeny v tabulce 7, je zřejmé, že až na průběžnou identifikaci bez zatížení poruchové veličiny, se hodnota tohoto kritéria pro oba akční zásahy pohybuje řádově v tisících. Nejmenší hodnota maximálního rozsahu byla při regulaci s pevně nastavenými parametry.

Tabulka 7 – Vyhodnocení kvality regulace pomocí kvadratického kritéria se závislostí na sumě přírůstků akční veličiny

Typ regulace:	$S_{u1}$ [-]	$S_{u2}$ [-]	$u_{1\_min}$ [V]	$u_{1\_max}$ [V]	$u_{2\_min}$ [V]	$u_{2\_max}$ [V]
S pevně nastavenými parametry	0,0071	0,0011	-4,797	8,165	-4,174	6,257
S pevně nastavenými parametry zatížené poruchou	0,0051	0,0054	-10	7,043	0,042	10
S průběžnou identifikací	$9,05 \cdot 10^{-4}$	$9,15 \cdot 10^{-4}$	-8,367	4,104	-3,362	10
S průběžnou identifikací zatížené poruchou	0,0037	0,0063	-9,548	10	-10	10

## 7.2 Simulace regulačních pochodů

Srovnání regulace s pevně nastavenými parametry a s průběžnou identifikací je provedeno pomocí stejných kvadratických kritérií, jako u reálné soustavy v kapitole 7.1.

Tabulka 8 - Vyhodnocení kvality regulace ze simulace pomocí sumačního kvadratického kritéria se závislostí na regulační odchylce

Typ regulace:	$S_{y1}$ [-]	$S_{y2}$ [-]	$y_{1\_min}$ [MU]	$y_{1\_max}$ [MU]	$y_{2\_min}$ [MU]	$y_{2\_max}$ [MU]
S pevně nastavenými parametry	$1,15 \cdot 10^{-4}$	$1,39 \cdot 10^{-4}$	0	0,2010	0	0,2208
S průběžnou identifikací	$1,22 \cdot 10^{-4}$	$3,85 \cdot 10^{-4}$	0	0,2018	0	0,2213

Dle vypočítaných hodnot dosahuje nepatrně horší kvality regulace s průběžnou identifikací, což může být dáno prvotním určováním parametrů regulace. Jedná se ale o rozdíly řádově v desítitisících, což se může jevit jako nepodstatné. V takovém případě by byly regulace srovnatelné.

Tak stejně dosahuje horší kvality i co se týče závislosti na sumě přírůstků akční veličiny.

Tabulka 9 - Vyhodnocení kvality regulace ze simulace pomocí kvadratického kritéria se závislostí na sumě přírůstků akční veličiny

Typ regulace:	$S_{u1}$ [-]	$S_{u2}$ [-]	$u_{1\_min}$ [V]	$u_{1\_max}$ [V]	$u_{2\_min}$ [V]	$u_{2\_max}$ [V]
S pevně nastavenými parametry	$5,61 \cdot 10^{-5}$	$9,62 \cdot 10^{-5}$	0,019	6,080	0,081	8,438
S pevně nastavenými parametry zatížené poruchou	0,0082	0,0061	0,122	7,342	0,122	7,781

Je ale nezbytné dodat, že odhady koeficientů ventilů, které byly v simulačním modelu využity, nemusí odpovídat reálné hodnotě. Proto zde nejsou srovnány výsledky simulací a reálného měření.

## ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá návrhem prediktivního řízení na řízení soustavy spojených nádrží DTS200. Tento model poskytuje mnoho různých konfigurací, neboť umožňuje použití až 8 akčních zásahů a až 3 regulované veličiny. Konfigurace soustavy pro tuto práci byla zvolena jako MIMO – se dvěma vstupy a dvěma výstupy. Vstupem do soustavy byly brány dvě čerpadla, která napouští vodu do první a poslední nádrže a pro výstup byly zvoleny výšky hladiny právě v těchto dvou zásobnících.

Za účelem lepšího poznání soustavy a návrhu řízení byl sestaven matematický model, který je odvozen v kapitole 4, a který také sloužil jako základní stavební prvek pro simulační model soustavy. Tento model byl vytvořen v prostředí Matlab, Simulink jako S-funkce, neboť tak byly výrazně zvýšeny možnosti jeho ovládání v Simulinku.

Na vytvořeném modelu byly nasimulovány statické charakteristiky pro obě výšky hladiny, které jsou uvedeny v kapitole 5.2.1, a také byla provedena identifikace soustavy. Při ní byl systém vybuzen dvěma náhodnými signály s Gaussovým rozložením (vždy jeden pro jedno čerpadlo), a z odezvy na tyto signály byly vypočítány metodou nejmenších čtverců parametry pro regulaci. Tyto výsledky jsou popsány v kapitole 5.2.2.

Následně byl odvozen prediktivní regulátor pro danou soustavu. Výpočet predikcí je uveden v kapitole 5.3.1. Do regulátoru byly zahrnuty také omezení, které má reálná soustava v podobě vstupního napětí obou čerpadel.

Pro řízení soustavy byla zvolena jednak regulace s pevně nastavenými parametry, ale také regulace s průběžnou identifikací, která byla vypočítávána rekurzivní metodou nejmenších čtverců. Ze statické charakteristiky byla vybrána oblast řízení pro obě výstupní veličiny a žádaná hodnota byla vytvořena za pomoci skokových změn, které se v praxi vyskytují nejčastěji. Obě regulace jsou popsány v kapitolách 5.4 a 5.5.

Po vyzkoušení si řízení na simulačním modelu bylo přistoupeno k reálnému objektu. V první fázi práce bylo potřeba provést kalibrace měřících senzorů, neboť prostředí Matlab si jednotlivé signály přepočítává na Matlab Unit v rozmezí od -1 do 1. Jednotlivé výšky hladiny byly přepočítány na hodnoty od 0 do 1. Výsledky kalibrace jsou uvedeny v kapitole 6.1. Další postup plnění práce byl totožný se simulacemi, tudíž následovalo měření statické charakteristiky. Zde bylo napětí obou čerpadel proměřováno po kroku 2V a i tak byla statická charakteristika časově náročná, neboť ustálení výstupní veličiny pro

jednu zvolenou variantu napětí obou čerpadel trvalo přibližně 20 minut. Celkem byly naměřeny data, jejichž výsledky určily matice o rozměru  $(11 \times 11)$  pro každou výšku hladiny. V práci jsou ale uvedeny pouze charakteristiky těch nádrží, u nichž se regulují výšky hladiny, tedy krajní zásobníky. Při plnění tohoto měření byly jasně vidět nelinearity, které do systému vstupují, například v podobě bublinek, které se mohou vytvářet v potrubí regulačních ventilů při nízké hladině vody v nádrži.

Identifikace soustavy byla provedena v několika periodách vzorkování, neboť nebylo zcela jasné, jak rychle dokáže soustava zareagovat. Jako nejnižší možná perioda vzorkování byla zvolena perioda 2s. Kompletní výsledky uvedené v této diplomové práci se proto vztahují na tuto periodu vzorkování.

Po zjištění parametrů regulace byl naměřen regulační pochod s totožně nastavenými žádanými hodnotami jako u simulace. Výsledky této regulace jsou uvedeny v kapitole 6.3. Hned v zápětí byla naměřena regulace i s průběžnou identifikací (kapitola 6.4).

V poslední fázi práce byly srovnány výsledky regulací s pevně nastavenými parametry s průběžnou identifikací.

Jelikož se jedná o soustavu s nelineárním charakterem, která má v různých pracovních bodech různé parametry, dalo by se předpokládat, že regulace s průběžnou identifikací bude kvalitnější. Soustava má ale integrační charakter, takže rozdíl v kvalitě regulačního pochodu s pevně nastavenými parametry a s průběžnou identifikací není příliš patrný. Proto bylo vyzkoušeno také zanesení poruchové veličiny v průběhu regulace. Porucha byla reprezentována otevřením ventilu, který vypouští vodu z prostřední nádrže do akumulací jímky pod zásobníky. Tyto výsledky jsou uvedeny v kapitole 6.3.1 a 6.4.1. I v těchto případech ale dokázal regulátor s pevně nastavenými zareagovat zvýšením vstupního napětí obou čerpadel a nedošlo k poklesu měřených výstupních veličin. Použití průběžné identifikace pro tento konkrétní proces integračního charakteru tak nemá opodstatnění. Je ale použitelný pro jiné nelineární systémy.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] NAVRÁTIL, Pavel. *Automatizace - Vybrané statě*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011. ISBN 978-80-7318-935-8.
- [2] ROSSITER, J.A. *Model-Based Predictive Control a Practical Approach*. London: CRC Press, 2003. ISBN 0203503961.
- [3] CAMACHO, E. F. a C. BORDONS. *Model predictive control*. New York: Springer, c2004. ISBN 1852336943.
- [4] AMIRA. *DTS200: Laboratory Setup Three - Tank - System*. 2002, 270 s. Dostupné také z: [http://www.utm.mx/~jvasquez/tanques\\_lab.pdf](http://www.utm.mx/~jvasquez/tanques_lab.pdf)
- [5] CHALUPA, Petr, Jakub NOVÁK a Vladimír BOBÁL. Comprehensive model of DTS200 three tank system in Simulink. *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences* [online]. 2012, vol. 6, iss. 2, s. 358-365. [cit. 2016-02-01]. ISSN 1998-0140. Dostupné z: [https://publikace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/1002755/Fulltext\\_1002755.pdf?sequence=1&isAllowed=n](https://publikace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/1002755/Fulltext_1002755.pdf?sequence=1&isAllowed=n)
- [6] CHALUPA, Petr a Jakub NOVÁK. *DTS200 - 3 nádrže*. Zlín, 2010. Dostupné také z: [http://vyuka.fai.utb.cz/pluginfile.php?file=%2F42999%2Fmod\\_assign%2Fintroattachment%2F0%2F10%20DTS200\\_3\\_nadrze.pdf&forcedownload=1](http://vyuka.fai.utb.cz/pluginfile.php?file=%2F42999%2Fmod_assign%2Fintroattachment%2F0%2F10%20DTS200_3_nadrze.pdf&forcedownload=1)
- [7] MIKLEŠ, Ján a Miroslav FIKAR. *Modelovanie, identifikácia a riadenie procesov I: Modely a dynamické charakteristiky spojitéch procesov*. 1. vydání. Bratislava: STU, Bratislava, Vazovova 5, 1999. ISBN 80-227-1289-2.
- [8] BOBÁL, Vladimír. *Identifikace systémů*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2009. ISBN 978-80-7318-888-7.
- [9] HŘEBÍČEK, Jiří a Michal ŠKRDLA. *Úvod do matematického modelování* [online]. Brno: Masarykova univerzita, 2006 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/el/1431/podzim2007/Bi3101/um/skripta.pdf>
- [10] MIKLEŠ, Ján a Miroslav FIKAR. *Modelovanie, identifikácia a riadenie procesov II: Identifikácia a optimálne riadenie*. Bratislava: STU, Bratislava, Vazovova 5, 2004.
- [11] BAYER, Tomáš. *Metoda nejmenších čtverců*. Praha. Dostupné také z: <https://web.natur.cuni.cz/~bayertom/Mmk/mnc.pdf>

- [12] BOBÁL, Vladimír. *Adaptivní a prediktivní řízení*. 1. vydání. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007. ISBN 978-80-7318-662-3.
- [13] HNILIČKA, Bohumil a Petr PIVOŇKA. *Implementace složitých řídicích algoritmů z programu Matlab - Simulink do prostředí programovatelných automatů*. Praha.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

MNČ	Metoda nejmenších čtverců.
RMNČ	Rekurzivní metoda nejmenších čtverců.
MPC	Model Predictive Control.
MU	Matlab Unit.
MIMO	Multiple – Input – Multiple – Output.
PID	Proporcionální – Integrovní – Derivační.
$\hat{y}(k)$	Predikce výstupní veličiny.
$e(k)$	Regulační odchylka.
$y$	Výstupní veličina.
$T_0$	Perioda vzorkování.
$N_1$	Minimální predikční horizont.
$N_2$	Maximální predikční horizont.
$N_u$	Řídicí horizont.
$w$	Žádaná hodnota.
$k$	Krok.
$G$	Matice dynamiky.
$g_{ij}$	Prvky matice $G$ .
$P$	Matice potřebná k výpočtu predikcí.
$p_{ij}$	Prvky matice $P$ .
$Q$	Matice potřebná k výpočtu predikcí.
$q_{ij}$	Prvky matice $Q$ .
$y_0$	Vektor odezvy.
$\lambda$	Váhový koeficient.

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1:	Model spojených nádrží DTS 200.....	12
Obr. 2:	Celkové schéma modelu spojených nádrží .....	15
Obr. 3:	Schematický postup při identifikaci [7] .....	17
Obr. 4:	Princip prediktivního řízení [12] .....	25
Obr. 5:	Schéma modelu spojených nádrží .....	33
Obr. 6:	Nalevo blok (maska) reprezentující model v Simulinku, napravo blok pro S-funkci .....	36
Obr. 7:	Funkční blok pro zadávání parametrů do S-funkce simulačního modelu .....	37
Obr. 8:	Nalevo funkční blok prediktivního regulátoru, napravo schéma regulátoru pod maskou .....	43
Obr. 9:	Simulační schéma pro regulaci s pevně nastavenými parametry .....	44
Obr. 10:	Schéma prediktivního regulátoru s průběžnou identifikací.....	45
Obr. 11:	Ukázka zakomponování rovnice regrese do měřícího schéma .....	49
Obr. 12:	Schéma pro měření statické charakteristiky .....	50
Obr. 13:	Schéma pro regulaci s průběžnou identifikací na reálné soustavě .....	57

**SEZNAM GRAFŮ**

Graf 1:	Model parametru $k_2$ pro propouštěcí ventil mezi druhou a třetí nádrží[5] .....	15
Graf 2:	Metoda nejmenších čtverců aplikovaná na dvojrozměrná data .....	19
Graf 3:	Nasimulovaná statická charakteristika pro výšku hladiny v 1. nádrži.....	38
Graf 4:	Nasimulovaná statická charakteristika pro výšku hladiny v poslední nádrži.....	38
Graf 5:	Nahoře náhodně generovaný signál použitý na vybuzení simulační soustavy pro první čerpadlo, dole signál pro druhé čerpadlo .....	39
Graf 6:	Odezva simulačního systému na generovaný signál obou čerpadel.....	40
Graf 7:	Simulace regulace s pevně nastavenými parametry a periodou vzorkování 2s .....	44
Graf 8:	Akční zásah pro simulaci regulace s pevně nastavenými parametry a periodou vzorkování 2s .....	45
Graf 9:	Simulace regulace s průběžnou identifikací a periodou vzorkování 2s .....	46
Graf 10:	Akční zásah pro simulaci regulace s průběžnou identifikací a periodou vzorkování 2s .....	46
Graf 11:	Průběh parametrů při simulaci regulace s periodou vzorkování 2s.....	47
Graf 12:	Podrobnější náhled na průběh parametrů při simulaci regulace s periodou vzorkování 2s .....	47
Graf 13:	Kalibrace měřících senzorů .....	49
Graf 14:	Naměřená data do statické charakteristiky při pevném nastavení 2. čerpadla na hodnotu 2V a měnícím se vstupním napětí 1. čerpadla od 10V až po 0V při kroku 2V .....	50
Graf 15:	Naměřená data do statické charakteristiky při pevném nastavení 2. čerpadla na hodnotu 2V a měnícím se vstupním napětí 1. čerpadla od -2V až po -10V při kroku 2V .....	51
Graf 16:	Naměřená statická charakteristika pro 1. nádrž, nalevo přímý pohled, napravo pohled pravé strany .....	52
Graf 17:	Statická charakteristika pro poslední nádrž, nalevo přímý pohled, napravo pohled	

zleva .....	53
Graf 18: Nahoře náhodně generovaný signál použitý na vybuzení soustavy pro první čerpadlo, dole signál pro druhé čerpadlo.....	54
Graf 19: Odezva soustavy na náhodný signál ve formě výšky hladiny v obou nádržích .....	54
Graf 20: Regulace s pevně nastavenými parametry a periodou vzorkování 2s .....	55
Graf 21: Akční zásah obou čerpadel pro regulaci s pevně nastavenými parametry a periodou vzorkování 2s .....	55
Graf 22: Zanesení poruchové veličiny do regulace s pevně nastavenými parametry a periodou vzorkování 2s .....	56
Graf 23: Akční zásah pro regulační pochod s pevně nastavenými parametry a se zanesenou poruchovou veličinou .....	56
Graf 24: Regulace s průběžnou identifikací a periodou vzorkování 2s .....	58
Graf 25: Akční zásah obou čerpadel pro regulaci s průběžnou identifikací a periodou vzorkování 2s .....	58
Graf 26: Měnicí se parametry po čas regulačního pochodu s periodou vzorkování 2s .....	58
Graf 27: Detailní zobrazení měnicích se parametrů při regulačním pochodu .....	59
Graf 28: Zanesení poruchové veličiny do regulace s průběžnou identifikací a periodou vzorkování 2s .....	59
Graf 29: Akční zásah pro regulační pochod se zanesenou poruchovou veličinou .....	60
Graf 30: Průběh parametry při regulaci se zavedenou poruchovou veličinou a periodou vzorkování 2s .....	60
Graf 31: Detailní náhled na parametry při regulaci se zavedenou poruchovou veličinou.....	61

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1:	Celkové parametry modelu [4].....	14
Tab. 2:	Rozměry jednotlivých zásobníků [4] .....	14
Tab. 3:	Parametry čerpadel s DC motorem [4].....	14
Tab. 4:	Data pro 3D statickou charakteristiku první nádrže.....	51
Tab. 5:	Data pro 3D statickou charakteristiku poslední nádrže.....	52
Tab. 6:	Vyhodnocení kvality regulace sumačním kvadratickým kritériem se závislostí na regulační odchylce.....	62
Tab. 7:	Vyhodnocení kvality regulace pomocí kvadratického kritéria se závislostí na sumě přírůstků akční veličiny.....	63
Tab. 8:	Vyhodnocení kvality regulace ze simulace pomocí sumačního kvadratického kritéria se závislostí na regulační odchylce.....	63
Tab. 9:	Vyhodnocení kvality regulace ze simulace pomocí kvadratického kritéria se závislostí na sumě přírůstků akční veličiny .....	64


## SEZNAM PŘÍLOH

- P I* Adresářová struktura na CD.
- P II* Zdrojový kód S-funkce simulačního modelu.
- P III* Schéma pro ovládání modelu spojených nádrží.

# PŘÍLOHA P I: ADRESÁŘOVÁ STRUKTURA NA CD





K této diplomové práci je přiloženo CD, které obsahuje:

 fulltext







 Základní informace o souborech na CD

## 1. SIMULACE





### 1. Statická charakteristika

-  dataStickaCharakteristika
-  model
-  statickaCharakteristika\_model.slx
-  statickaCharakteristika\_vypocet






### 2. Identifikace

-  akcni\_pred
-  generovanySignal\_Odezva
-  identifikace\_MNC
-  identifikace\_model.slx
-  model
-  vypocitaneParametry

### 3. Regulace s pevně nastavenými parametry



-  akcni\_pred
-  DataRegulace\_2s
-  model
-  prediktivni\_PevneParametry\_model.slx

### 4. Regulace s průběžnou identifikací

-  akcni\_pred
-  DataPrubeznaIdentifikace\_2s
-  identifikace\_RMNC
-  model
-  prediktivni\_prubezna\_model.slx

## 2. REÁLNÁ MĚŘENÍ




### 1. Kalibrace

-  dataKalibrace
-  kalibrace.mdl





### 2. Statická charakteristika

-  DataStickaCharakteristika\_vyhodnoceni
-  nadrz1
-  nadrz3
-  StatickaCharakteristika.mdl






### 3. Identifikace


-  DataIdentifikace\_2s
-  identifikace\_vybuzeni.mdl
-  identifikace\_MNC


### 4. Regulace s pevně nastavenými parametry

-  akcni\_pred
-  Data\_ChybaPevneParametry\_2s
-  Data\_PevneParametry\_2s
-  prediktivni\_pevneParametry.mdl

### 5. Regulace s průběžnou identifikací

-  akcni\_pred
-  Data\_ChybaPrubeznaIdentifikace\_2s
-  Data\_PrubeznaIdentifikace\_2s
-  identifikace\_RMNC
-  prediktivni\_PrubeznaIdentifikace.mdl

 vykresleniGrafu

 vyhodnoceniKvalityRegulace

## PŘÍLOHA P II: ZDROJOVÝ KÓD S-FUNKCE SIMULAČNÍHO MODELU

```
% SIMULAČNÍ SCHÉMA PRO MODEL SPOJENÝCH NÁDRŽÍ
% PŘI KONFIGURACI 2 VSTUPY A 2 VÝSTUPY

function [sys,x0,str,ts]=vts(t,x,u,flag, K1,K2,K4,K6,S)

switch flag
case 0
    [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes;
case 1
    sys = mdlDerivatives(t,x,u, K1,K2,K4,K6,S);
case {2,9}
    sys = [];
case 3
    sys = mdlOutputs(t,x,u);
otherwise
    error(['unhandled flag = ',num2str(flag)]);
end

% INICIALIZACE
function [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 3;
sizes.NumDiscStates = 0;
sizes.NumOutputs = 2; % x1, x3
sizes.NumInputs = 2; % u1, u2
sizes.DirFeedthrough = 0;
sizes.NumSampleTimes = 1;

sys = simsizes(sizes);
str = [];
x0 = [0 0 0];
ts = [0 0];

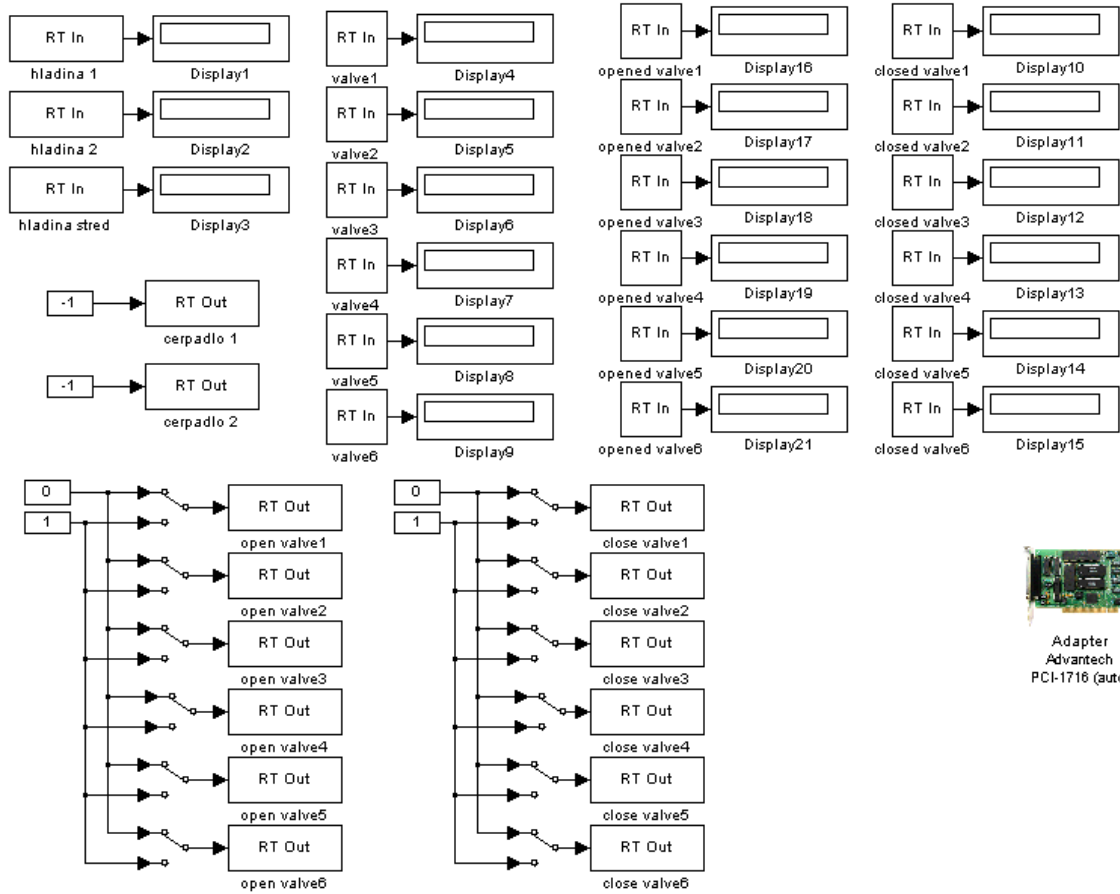
% ROVNICE MATEMATICKÉHO MODELU
function sys = mdlDerivatives(t,x,u, K1,K2,K4,K6,S)
q1=(K1/S)*sqrt(abs(x(1)-x(2)));
if x(1)<x(2)
q1=-q1;
end

q2=(K2/S)*sqrt(abs(x(2)-x(3)));
if x(2)<x(3)
q2=-q2;
end

sys(1) = -q1 - (K4/S)*sqrt(abs(x(1))) + (1/S)*u(1);
sys(2) = q1 - q2;
sys(3) = q2 - (K6/S)*sqrt(abs(x(3))) + (1/S)*u(2);

% VÝSTUP
function sys = mdlOutputs(t,x,u)
sys = [x(1) x(3)];
```

# PŘÍLOHA P III: SCHÉMA PRO OVLÁDÁNÍ MODELU SPOJENÝCH NÁDRŽÍ



Adapter Advantech PCI-1716 (auto)