

# **Řízení teploty při procesu rychloohřevu teplé užitkové vody**

Heat Regulation during the Process of Speed-Heating  
of Hot Supply Water

Bc. Drahomír Janeček

---

Diplomová práce  
2008



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
Ústav automatizace a řídicí techniky  
akademický rok: 2007/2008

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Drahomír JANEČEK**  
Studijní program: **N 3902 Inženýrská informatika**  
Studijní obor: **Automatické řízení a informatika**

Téma práce: **Řízení teploty při procesu rychloohřevu teplé užitkové vody**

Zásady pro vypracování:

1. Změřte statické a dynamické charakteristiky řízeného procesu
2. Analyzujte systém z hlediska dynamických vlastností
3. Sestavte analytický model řízeného procesu
4. Vyberte vhodné řídicí algoritmy
5. V prostředí Matlab simulujte řízení procesu pomocí vytvořeného matematického modelu
6. Realizujte řízení reálného procesu v prostředí pro vytváření aplikací v reálném čase

Rozsah práce:

Rozsah příloh:


Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:


1. Balátě,J.2003.Automatické řízení.BEN.
2. Švarc,I.2005.Automatizace.CERM.
3. Noskievič,P.1999.Modelování a identifikace systémů.Montanex.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Marek Kubalčík, Ph.D.  
Ústav řízení procesů  
Datum zadání diplomové práce: 22. února 2008  
Termín odevzdání diplomové práce: 6. června 2008

Ve Zlíně dne 22. února 2008

  
prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
děkan



  
prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
ředitel ústavu

## **ABSTRAKT**

Práce je zaměřena na řízení teploty užitkové vody ve výměňkové stanici ve firmě zabývající se dodáváním tepla a TUV. Cílem práce je výběr, implementace a ověření vhodných algoritmů řízení, které by utvořily základ výkonnější a spolehlivější alternativy k současnému řešení vestavěnému v komerčně dostupnému regulačnímu systému Tronic 2008E, resp. by do tohoto řídicího systému mohly být implementovány. Při návrhu regulátorů byly využívány polynomiální metody. V samočinně se nastavujících verzích byla pro identifikaci parametrů soustavy využita metoda nejmenších čtverců s adaptivním směrovým zapomínáním. Cílem bylo porovnat dosažené výsledky regulačních pochodů s použitím jednotlivých regulátorů, a zvolit regulátory které jsou pro daný proces nejvhodnější.

Klíčová slova: moderní metody řízení, adaptivní regulátory, S – funkce, rychloohřev teplé užitkové vody

## **ABSTRACT**

This subject of this thesis is regulation of hot supply water in junction exchange station used in a company which is a supplier of heat and hot supply water. The main goal of this thesis was to select, implement and verify appropriate regulatory algorithms which should become a basis for more efficient and reliable alternative to the commercially available system Tronic 2008E and could be implemented into this system at the same time. Polynomial methods were used to design the regulators. For the self-tuning versions, the method of least squares with adaptive directional forgetting was used to identify the parameters of the system. The goal was to compare the attained results of the regulatory procedures for each single regulator and to choose those which are the most appropriate for the given process.

Keywords: modern methods of regulation, adaptive regulators, S-functions, speed-heating of hot supply water

Chtěl bych poděkovat na prvním místě svému vedoucímu Marku Kubalčíkovi za vzorné vedení a podnětné diskuse při experimentech i psaní této práce. Rád bych dále vyjádřil dík své ženě a rodině za podporu a pochopení během celého studia.

Prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvolněno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně

.....  
Podpis diplomanta

**OBSAH**

<b>ÚVOD</b> .....	<b>8</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 POPIS SOUSTAVY RYCHLOOHŘEVU TEPLÉ UŽITKOVÉ VODY</b> .....	<b>11</b>
1.1 MECHANICKÁ ČÁST .....	11
1.1.1 Pájený deskový výměník .....	11
1.1.2 Analytický model výměníku tepla.....	12
1.2 ELEKTRICKÁ ČÁST .....	14
1.2.1 Regulační ventil s magnetickým pohonem .....	14
1.2.2 Snímače teploty s rychlou odezvou .....	17
1.2.3 Převodníky teplota napětí.....	18
1.2.4 Oběhové čerpadlo WILO .....	19
1.2.5 Programovatelná řídicí stanice T2008E .....	20
<b>2 POPIS POUŽITÝCH ALGORITMŮ</b> .....	<b>22</b>
2.1 ZVOLENÝ MODEL.....	22
2.2 NÁVRH 1DOF DISKRÉTNÍCH REGULÁTORŮ .....	23
2.2.1 Návrh diskrétního regulátoru založeného na požadavku na průběh přechodového děje spojité soustavy druhého řádu (1R1).....	23
2.2.2 Návrh diskrétního regulátoru založeného na požadavku na konkrétní přechodový děj (1R2).....	25
2.3 NÁVRH 2DOF DISKRÉTNÍCH REGULÁTORŮ .....	26
2.3.1 Návrh diskrétního regulátoru založeného na požadavku na průběh přechodového děje spojité soustavy druhého řádu (2R1).....	26
2.3.2 Návrh diskrétního regulátoru založeného na požadavku na konkrétní přechodový děj (2R2).....	27
2.4 PSD REGULÁTOR.....	28
2.5 PRŮBĚŽNÁ IDENTIFIKACE REKURZIVNÍ METODOU NEJMENŠÍCH ČTVERCŮ.....	28
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>31</b>
<b>3 EXPERIMENTY A REGULACE NA SOUSTAVĚ TUV</b> .....	<b>32</b>
3.1 POPIS SOUSTAVY .....	32
3.1.1 Popis měřených signálů.....	32
3.2 CHARAKTERISTIKY SOUSTAVY .....	33
3.3 IDENTIFIKACE SOUSTAVY .....	34
3.4 ŘÍZENÍ TEPLoty TUV .....	36
3.4.1 Simulace řízení.....	39
3.4.2 Řízení pomocí diskrétních regulátorů s 1DOF konfigurací .....	41
3.4.3 Řízení pomocí diskrétních regulátorů s 2DOF konfigurací .....	44
3.4.4 Řízení pomocí adaptivních diskrétních regulátorů s 1DOF konfigurací.....	47
3.4.5 Řízení pomocí adaptivních diskrétních regulátorů s 2DOF konfigurací.....	50

3.5	ŘÍZENÍ TEPLoty PROVÁDĚNÉ NA SOUSTAVĚ TUV ZA PROVOZNÍCH PODMÍNEK .....	52
3.5.1	Řízení teploty prováděné na soustavě TUV za provozních podmínek stávajícím regulátorem .....	58
<b>ZÁVĚR .....</b>		<b>59</b>
<b>CONCLUSION .....</b>		<b>60</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>		<b>61</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>		<b>62</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>		<b>64</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>		<b>66</b>

## ÚVOD

Rychloohřev teplé užitkové vody (TUV) je součástí výměňkové stanice, která slouží pro dodávku tepla a TUV do bytových domů. Celá výměňková stanice se dá rozdělit na dvě části; první část slouží pro dodávku topení a druhá pro dodávku TUV. Stanice je řízena regulátorem Tronic 2008E. V případě řízení topení je využíván algoritmus založený na PS regulaci a v případě ohřevu TUV se jedná o PSD regulaci. Součástí algoritmu PSD je i adaptivní algoritmus, který má ovšem řadu nevýhod a není příliš spolehlivý.

Ohřev TUV probíhá v deskovém výměníku, a to tak, že na primární část je přiváděna horká voda z horkovodu. Řízením jejího průtoku pomocí magnetického ventilu je řízena teplota vody na sekundární straně výměníku. V současné době jsou řídicí algoritmy realizovány v komerčně dostupném systému Tronic. Regulátory jsou založeny na PS a PSD regulaci. Při tomto způsobu řízení teploty TUV se vyskytuje celá řada problémů, zvláště kolísání teploty vody vlivem velkých a náhlých odběrů, a to zejména ve večerních hodinách, kdy odběry dosahují denních špiček. Na kolísání teploty vody má vliv nastavení regulátoru (konstanty PSD) a také velikost objektu do kterého je TUV dodávána. Dimenze potrubí je závislá na velikosti objektu a je prakticky neměnná. Zbývají tedy dvě možnosti, jak zlepšit kvalitu dodávané TUV:

- 1) Do hydraulické části doplnit akumulární nádobu, jejíž velikost bude závislá na velikosti objektu, tím dojde ke zvětšení akumulace a zpomalení rychlosti celého děje.
- 2) Navrhnout vhodný algoritmus který si poradí z náhlými změnami odběrů TUV.

Komplikujícími faktory řízení ohřevu TUV jsou praktické obtíže při přesném měření resp. spolehlivém odhadu intenzity a velikosti odběrů v reálném čase. Tyto veličiny proto působí na soustavu jako náhodná (stochastická) složka.

Při zmiňovaných odběrech se výrazně mění parametry soustavy, a proto se zde přímo nabízejí řešení pomocí adaptivních algoritmů s využitím průběžné identifikace. Hlavním cílem práce je tedy výběr, implementace a ověření vhodných algoritmů řízení, které by vytvořily základ výkonnější a spolehlivější alternativy k současnému řešení vestavěnému v řídicím systému Tronic 2008E, resp. by do tohoto řídicího systému mohly být implementovány. Algoritmy budou navrženy s využitím polynomiálních metod v integrovaném prostředí pro simulace a modelování Matlab a roli regulátoru bude



zastupovat počítač. Matlab rovněž umožňuje řízení reálného systému, které v tomto případě bude realizováno kartou Advantech s využitím Real Time Toolboxu.

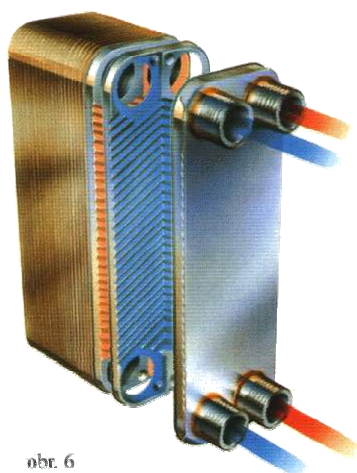
## I. TEORETICKÁ ČÁST

# 1 POPIS SOUSTAVY RYCHLOOHŘEVU TEPLÉ UŽITKOVÉ VODY

## 1.1 Mechanická část

### 1.1.1 Pájený deskový výměník

Pájené deskové výměníky tepla se používají ve všech typech ohřívacích i chladících procesů, kde se vyžaduje pohodlí, spolehlivost a bezpečnost. Ohřev a chlazení je ve většině případů otázkou zajištění pohodlného vnitřního prostředí doma, v práci nebo veřejných zařízeních. Ohřívat je třeba také vodu v vodovodech, vodu v bazénech, skleníky ap. Pájené výměníky tepla mají díky patentovaným konstrukčním a technologickým postupům při návrhu a výrobě jisté unikátní vlastnosti, jako jsou malé rozměry, vysoká teplotní a tlaková odolnost, malý vnitřní objem a vysokou účinnost [10].



obr. 6

*Obr. 1 Deskový výměník*

Při výrobě pájených deskových výměníků tepla se výhradně používá nerezová ocel **AISI 316** (odpovídá - ČSN 17348). Pro pájení se užívá čistá měď nebo pro speciální aplikace nikl. Ten se využívá hlavně tam, kde agresivita některého média resp. hygienické předpisy vylučují použití měděné pájky, např. v potravinářství (Ni pájka má z toho pohledu lepší vlastnosti než nerezový svár). Konstrukčně jsou pájené deskové výměníky tepla složeny z desek, které tvoří kanálové prostory, a tímto oddělují teplotně různá média. Desky jsou vzájemně spájeny vhodnou pájkou nejen po obvodu, ale i ve všech styčných bodech desek. Vytvoří se tak kompaktní a tuhý soubor desek. Umožňuje to speciální technologie výroby;

vylišované desky jsou proloženy tenkou fólií, která je pájkou. Ve vakuové peci pak dojde k dokonalému spájení bez oxidace. Výhodou je, že pájka je pak v minimálním kontaktu s médií, to obtéká pouze nerezové desky. Tím je dosaženo zmíněné tuhosti a vysoké teplotní odolnosti.



*Obr. 2 Detail tvaru kanálků*

Pájené deskové výměníky tepla díky své konstrukci mají vysoké provozní hodnoty zatěžování a ty jsou dány několika parametry, které navzájem tvoří ucelený systém provozních podmínek. Nedodržováním těchto parametrů dochází ke značnému zkrácení životnosti a nelze je tedy vyjímát z kontextu. Tyto parametry jsou jednak konstrukční a jednak provozní:

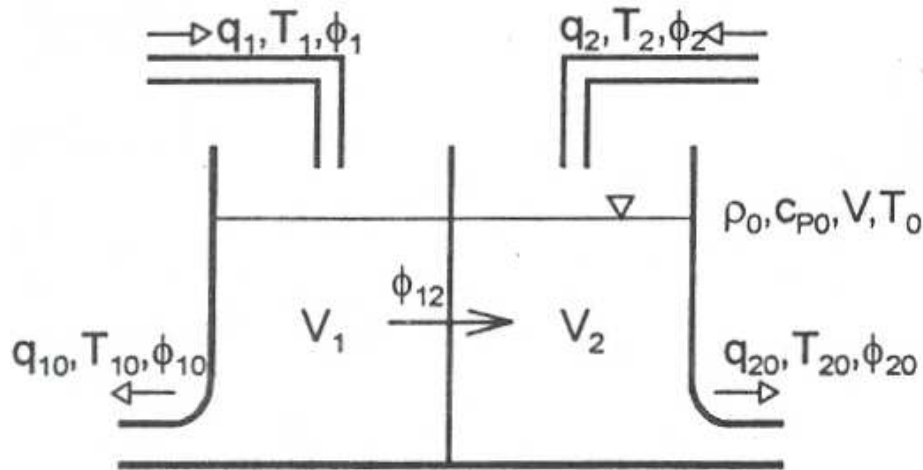
- konstrukční teplota a tlak, dané (s relativně vysokou provozní bezpečností) typem výměníku
- materiál pájky, který určuje oblasti výměníku
- způsob zatěžování výměníku, kdy cyklické zatěžování maximálně snižuje provozní hodnoty
- maximální rozdíly teplot v jednotlivých vstupních hrdlech jsou nižší než štítkové parametry
- typ média výměníku; např. pára má jiné provozní max. hodnoty než kapalná média

### **1.1.2 Analytický model výměníku tepla**

Výměník tepla je zařízení, ve kterém látka teplejší předává teplo látce chladnější. Deskový výměník byl uvažován jako jednoduchý výměník tepla bez tepelné kapacity

s teplosměnnou přepážkou o určité ploše[1]. Bylo vycházeno z obrázku ( Obr. 3) a z podmínek (1.1).

$$T_1 > T_2, T_{10} > T_{20} \quad (1.1)$$



Obr. 3 Nepřímý jednoduchý výměník

Teploty vytékajících látek  $T_{10}, T_{20}$  jsou popsány rovnicemi

$$\rho_1 c_{p1} V_1 \frac{dT_{10}}{dt} = \Phi_1 - \Phi_{10} - \Phi_{12} \quad (1.2)$$

$$\rho_2 c_{p2} V_2 \frac{dT_{20}}{dt} = \Phi_2 - \Phi_{20} - \Phi_{12}, \quad (1.3)$$

Kde  $\Phi_{12}$  je tepelný tok prostupu tepla přepážkou.

Po dosazení obdržíme

$$\rho_1 c_{p1} V_1 \frac{dT_{10}}{dt} = \rho_1 c_{p1} T_1 q_1 - \rho_1 c_{p1} T_{10} q_{10} - k_s S (T_{10} - T_{20}), \quad (1.4)$$

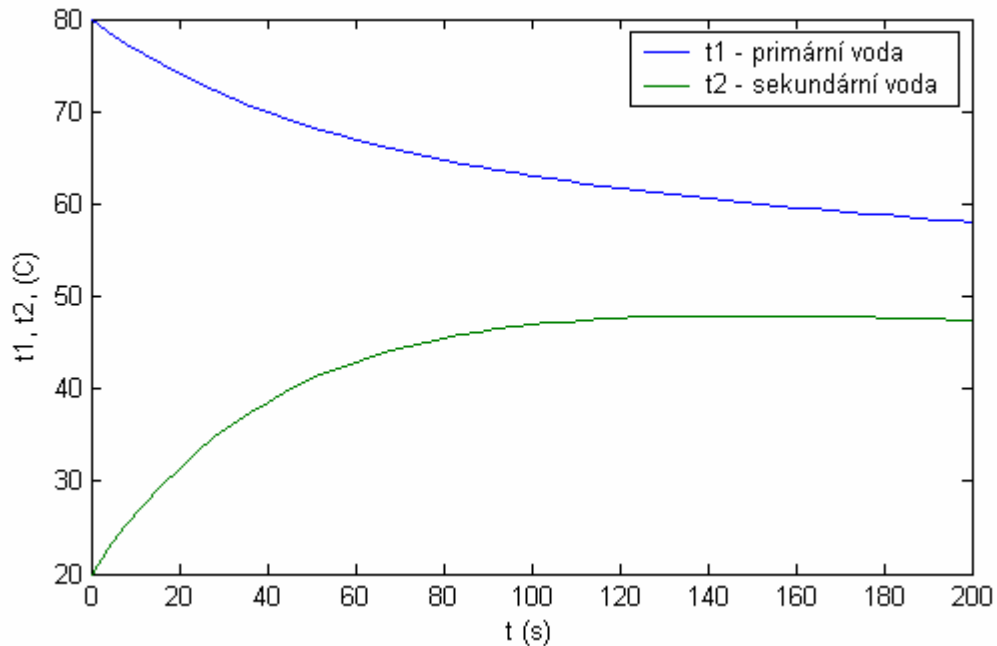
$$\rho_2 c_{p2} V_2 \frac{dT_{20}}{dt} = \rho_2 c_{p2} T_2 q_2 - \rho_2 c_{p2} T_{20} q_{20} + k_s S (T_{10} - T_{20}). \quad (1.5)$$

Pro tvorbu blokového schématu bylo vhodné rovnice upravit na tvar:

$$\frac{dT_{10}}{dt} = \frac{q_1}{V_1} T_1 - \frac{q_{10}}{V_1} T_{10} - \frac{k_s S}{\rho_1 c_{p1} V_1} (T_{10} - T_{20}), \quad (1.6)$$

$$\frac{dT_{20}}{dt} = \frac{q_2}{V_2} T_2 - \frac{q_{20}}{V_1} T_{20} - \frac{k_s S}{\rho_2 c_{p2} V_2} (T_{10} - T_{20}). \quad (1.7)$$

Do modelu vytvořeného v Matlabu se zadávají parametry o vstupní a výstupní vodě, velikost teplosměnné plochy výměníku a předpokládané průtoky.



Obr. 4 Průběhy teplot v simulačním modelu výměníku

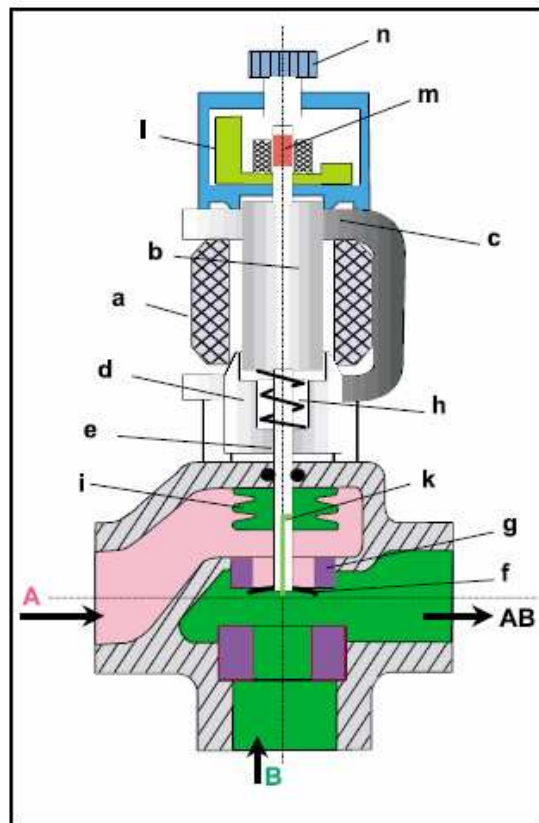
## 1.2 Elektrická část

### 1.2.1 Regulační ventil s magnetickým pohonem

Regulační ventily jsou směšovací nebo přímé a jsou osazeny magnetickým pohonem, ve kterém je již zabudován elektrický modul pro řízení polohy se zpětnou vazbou od polohy. Díky krátké přestavovací době, vysokému rozlišení a vysokému regulačnímu poměru jsou tyto ventily ideální pro spojitou regulaci topné a chladicí vody v uzavřených okruzích. Při automatickém provozu se řídicí signál v elektrickém modulu přemění na fázový řídicí signál, který vytváří magnetické pole v cívce. To způsobí změnu polohy kotvy, která je výsledkem spolupůsobení všech sil (magnetického pole, zpětné pružiny, hydraulických poměrů). Kotva okamžitě reaguje na jakékoliv změny signálu a přímo převádí svůj pohyb na regulační disk a tím rychle a přesně reguluje výkon. Poloha kotvy ventilu je spojitě

měřena (induktivně). Interní regulátor polohy okamžitě odstraňuje každou odchylku v systému a vysílá také vysílá zpětnou vazbu od polohy. Regulátor polohy zajišťuje přesný proporcionální vztah mezi řídicím signálem a zdvihem ventilu[9].

- |   |                           |
|---|---------------------------|
| a | Magnetická cívka          |
| b | Jádro                     |
| c | Držák                     |
| d | Pólový nástavec           |
| e | Vřeteno                   |
| f | Regulační disk            |
| g | Sedlo ventilu             |
| h | Vratná pružina            |
| i | Vlnovec                   |
| k | Otvor pro vyrovnání tlaku |
| l | Elektronika ventilu       |
| m | Induktivní měření zdvihu  |
| n | Knoflík ručního ovládání  |

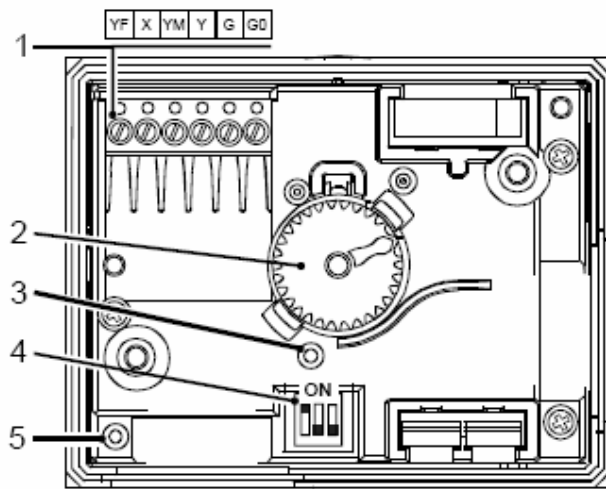


Obr. 5 Řez magnetickým ventilem

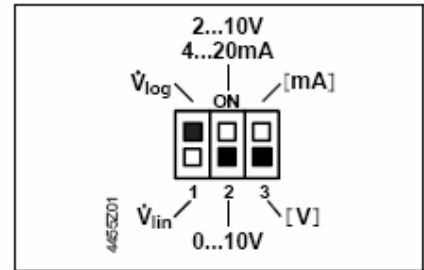
**Bezpečnostní funkce** – při přerušení řídicího signálu nebo při výpadku napájecího napětí je ventil zpětnou pružinou ventilu v přímém směru A→AB zavřen.

Řízení magnetického ventilu je možné realizovat celou řadou regulátorů, které poskytují řídicí signál DC 0/2...10V nebo 4...20 mA. Pro dosažení optimálního regulačního výkonu je doporučeno použít 4-vodičové zapojení, popřípadě při potřebě snímat i přesnou polohu ventilu od zpětné vazby je nutno použít 5-vodičové zapojení. Způsob připojení a označení jednotlivých svorek je patrné z krytu elektrické části ventilu. Dále je u tohoto ventilu možno nastavit druh řídicího signálu a (napětíový, proudový), a charakteristika (lineární, ekviprocentní). Při uvádění ventilu do provozu (zvláště při extrémních provozních podmínkách) může ventil při zdvihu 0% vykazovat v přímém směru A → AB netěsnost. Tato netěsnost může být velmi snadno a rychle odstraněna pomocí kalibračního tlačítka. Po

jeho stisknutí se ventil recalibruje a tím odstraní případnou netěsnost. V případě nutnosti je možné ventil ovládat ručně pomocí knoflíku ručního ovládání.

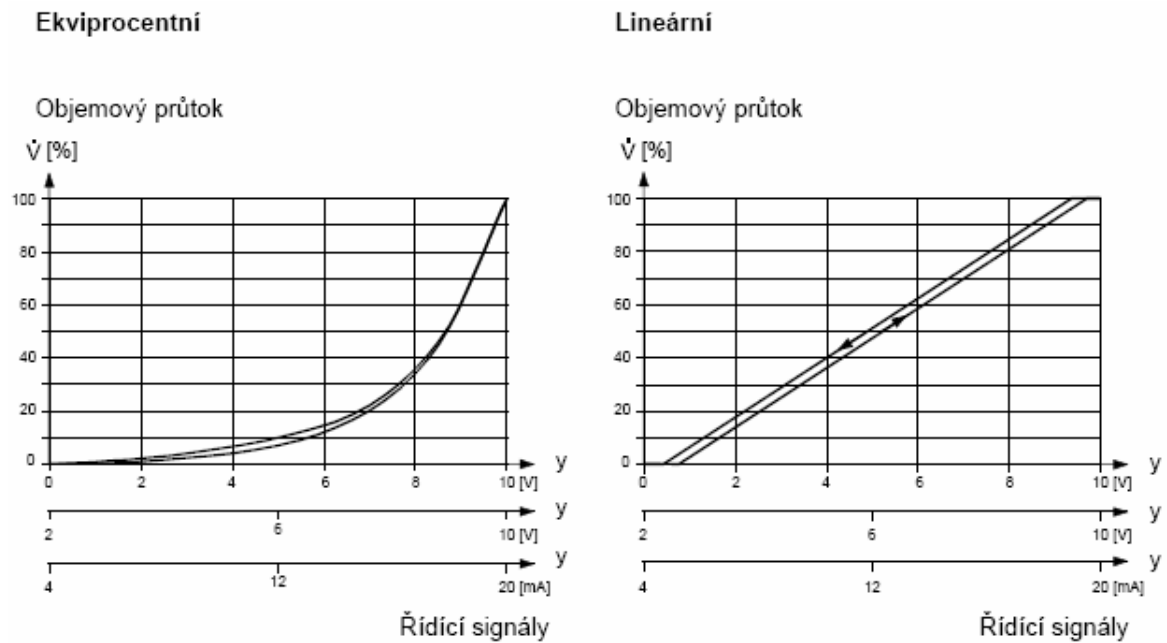


- 1 Připojovací svorkovnice
- 2 Knoflík ručního ovládání
- 3 Kalibrační tlačítko
- 4 DIL spínače pro řízení druhu provozu



- 5 LED indikátory provozních stavů

Obr. 6 Ovládací prvky a indikátory na elektronické desce

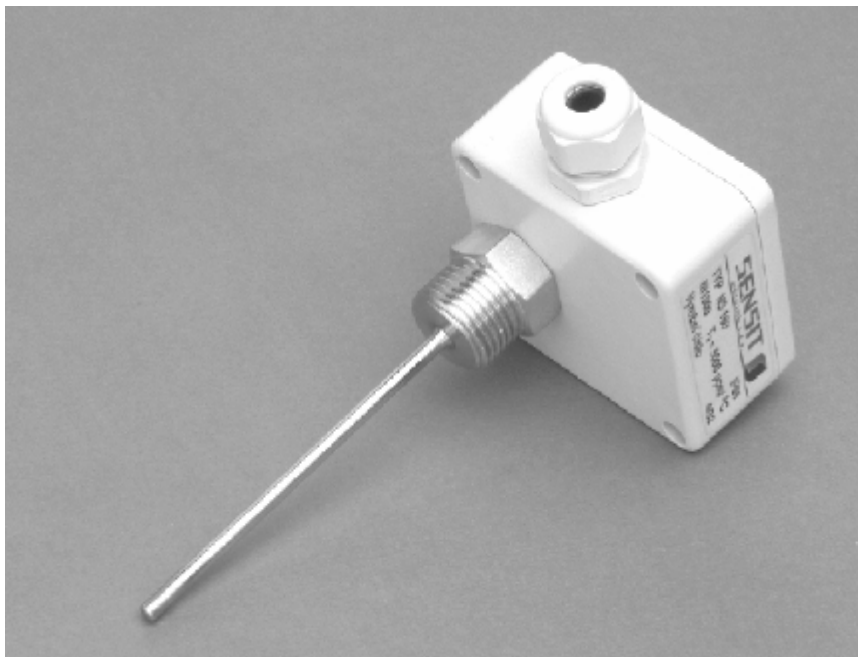


Obr. 7 Základní charakteristiky ventilu



### 1.2.2 Snímače teploty s rychlou odezvou

Tyto odporové snímače jsou určeny pro kontaktní měření teploty kapalných nebo plyných látek. Snímače jsou tvořeny plastovou hlavicí s kabelovou vývodkou. Uvnitř plastové hlavičky je umístěna svorkovnice. Dále je součástí snímače kovový měřicím stonek o průměru 4 mm, jehož součástí je šroubení. Stonek snímače je z nerez oceli a délky stonků 50, 100, 160 a 220 mm. Snímače vyhovují stupni ochrany IP 65 dle ČSN EN 60529.



*Obr. 8 Snímač teploty*

Konstrukce stonku snímače umožňuje použití pro přímé měření teploty v potrubích a zároveň zajišťuje rychlou odezvu snímače na změny teploty. Snímače je možné použít pro všechny řídicí systémy, které jsou kompatibilní s typy čidel uvedenými v tabulce. Při realizaci našich experimentů byly použity snímače NS 161. Standardní teplotní rozsah použití je -30 až 130 °C[7].

Typ snímače	NS 160 NS 160K	NS 161 NS 161K	NS 162 NS 162K
Typ čidla	Ni 1000/5000	Ni 1000/6180	Ni 891
Měřicí rozsah	-30 až 130 °C (teplota v okolí hlavičky -30 až 100 °C)		
Max. měřicí proud	0,3 mA	0,3 mA	0,3 mA

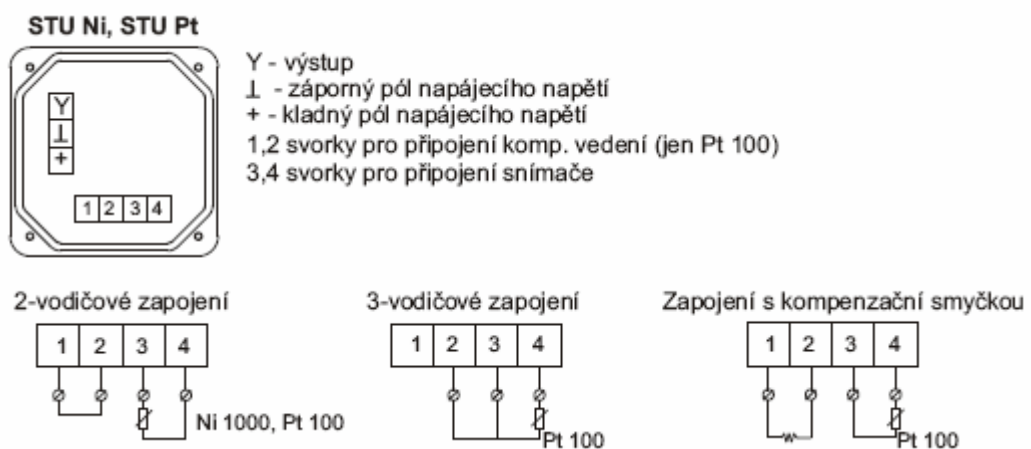
*Tab. 1 Technické parametry snímačů*

### 1.2.3 Převodníky teplota napětí

Převodníky typu STU jsou určeny k převodu signálu odporových snímačů teploty na bázi Ni 1000/6180 nebo Pt 100/3850 na unifikovaný signál 0 až 10V. Převodníky jsou tvořeny plastovou krabičkou z lexanu, ve kterém je umístěna elektronika a svorkovnice pro připojení odporového čidla a napájecího napětí. Krytí svorkovnice vyhovuje stupni IP 65 podle ČSN EN 60 529. Převodníky je možné použít pro všechny řídicí systémy, které jsou kompatibilní s napěťovým výstupem 0 až 10V. Měřicí rozsahy převodníků jsou uvedeny v tabulce technických parametrů[7].

Typ převodníku	STU Ni	STU Pt
Vstupní signál	Ni 1000/6180	Pt 100/3850
Výstupní signál	0 až 10 V	
Napájení(U <sub>NAP</sub> )	15 až 30 Vss (doporučená hodnota 24 Vss)	
Měřicí rozsahy	-30 až 60 °C 0 až 35 °C 0 až 100 °C 0 až 150 °C 0 až 200 °C 0 až 250 °C	-30 až 60 °C 0 až 35 °C 0 až 100 °C 0 až 150 °C 0 až 200 °C 0 až 400 °C
Krytí svorkovnice	IP 65	
Teplota okolí	-30 až 80 °C	
Chyba měření	< 0,8% z rozsahu	< 0,8% z rozsahu
Zatěžovací odpor	50 kΩ	
Odběr proudu	< 8mA	
Přerušení čidla	> 14 V	
Zkrat čidla	~0 V	
Zapojení snímače	dle schématu zapojení	
Typ svorkovnice	STU Ni, Studenti Pt: MEB 02001; průřez 0,35 až 1,5 mm <sup>2</sup>	
Materiál krabičky	STU Ni, Studenti Pt: LEXAN 500 R	
Hmotnost	0,15 kg	

Tab. 2 Technické parametry převodníků



Obr. 9 Detail svorkovnice a příklady zapojení

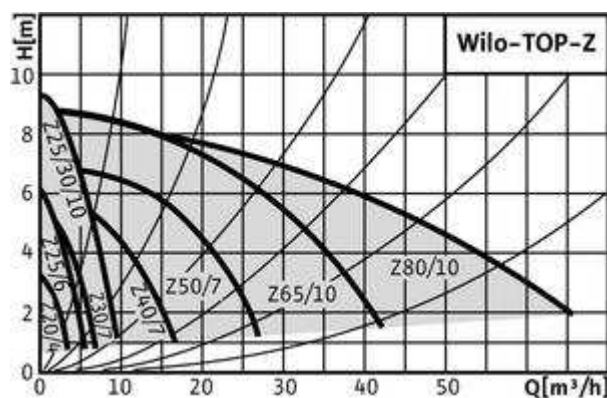
### 1.2.4 Oběhové čerpadlo WILO

Pro zajištění cirkulace je v okruhu TUV osazeno čerpadlo WILO TOP-Z 30/7. Jedná se o mokroběžné čerpadlo s možností nastavení otáček pomocí přepínače umístěného uvnitř svorkovnice. Tělo je z šedé litiny resp. červeného kovu, oběžné kolo z plastické hmoty zesílené skleněnými vlákny a hřídel z chromové oceli s uhlíkovými kluznými ložisky.

Mezi čerpadlem a motorem je mechanická ucpávka. Velkou výhodou tohoto konstrukčního řešení je velmi tichý chod čerpadla[8].



Obr. 10 Oběhové čerpadlo



Obr. 11 Charakteristika čerpadla

### 1.2.5 Programovatelná řídicí stanice T2008E

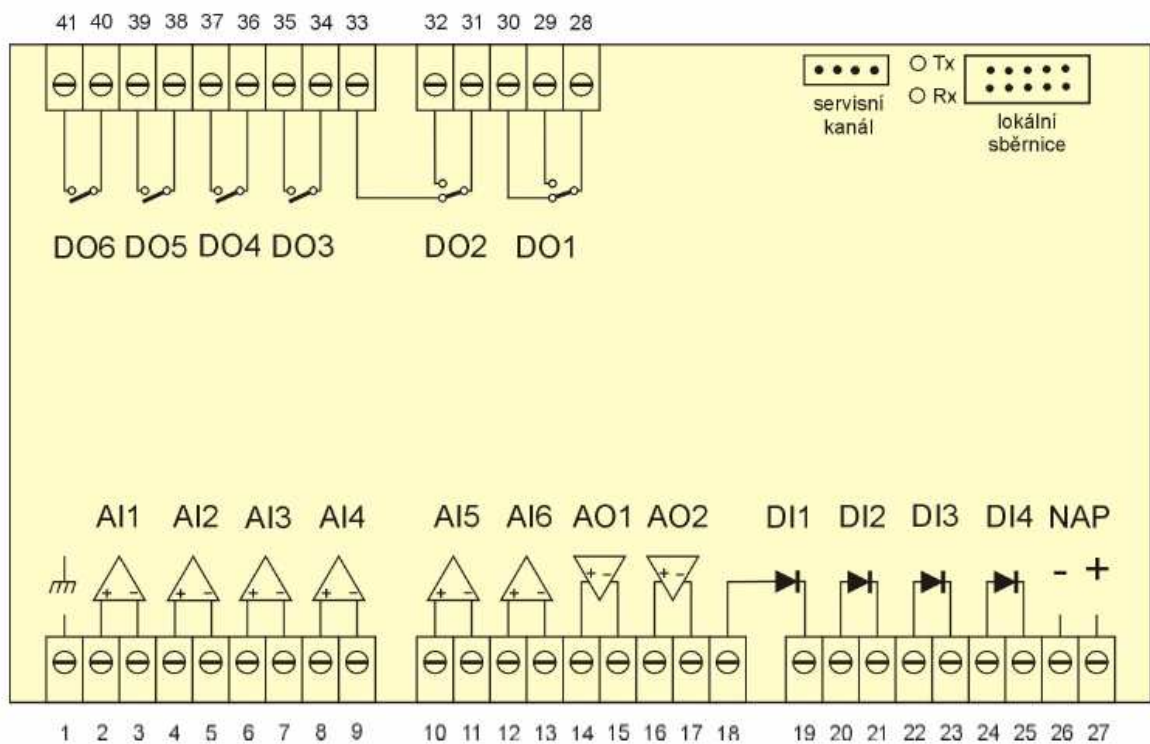
Řídicí stanice je modulární stavebnice řídicího systému která umožňuje realizaci regulace malých a středních aplikací [11]. Stanice je v minimální konfiguraci tvořena jedním regulátorem T2008E a napájecím zdrojem, který má mimo vlastního napájení regulátoru vyvedená napětí pro napájení dvouhodnotových vstupů a analogových smyček. Kompaktní regulátor má pevný počet vstupů a výstupů (6 x AI, 4 x DI, 2 x AO, 6 x DO). Součástí regulátoru je klávesnice a displej. Regulátor je vybaven i servisním komunikačním kanálem RS232. Pokud je počet vstupů a výstupů nedostatečný, může být rozšířen pomocí expanzních modulů. Pro jejich připojení slouží lokální sběrnice.



Obr. 12 Regulátor T2008E

Analogové vstupy se podle zdroje signálu osazují příslušnými unifikačními články. K regulátoru je možné připojit odporové teploměry Pt1000, Ni 1000 se strmostí 5000ppm/°C i 6178/°C, proud 0 – 20mA, 4 – 20mA, napětí 0 – 10V. Dále je možno použít analogový vstup jako dvouhodnotový s možností čítání impulzů. Analogové výstupy jsou napěťové s napětím 0 – 10V. Dvouhodnotové vstupy používají vstupní napětí v rozmezí pro stav “1” 12 – 30V a 0 – 5V pro stav “0”. Vstupy jsou galvanicky oddělené a jsou

vybaveny číslicovou filtrací. Reléové výstupy umožňují spínání stejnosměrných 48V/0.5A i střídavých 230/2A zátěží[11].



Obr. 13 Detail svorek regulátoru

## 2 POPIS POUŽITÝCH ALGORITMŮ

### 2.1 Zvolený model

Soustava TUV byla při návrhu regulátorů uvažována jako soustava druhého řádu. Tento model se osvědčil pro celou řadu procesu a zejména se ukázal jako vhodný popis pro tepelné děje. Diferenční rovnice je a přenos soustavy druhého řádu je uveden zde.

$$y(k) + a_1 y(k-1) + a_2 y(k-2) = b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2) \quad (1.8)$$

$$G(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (1.9)$$

Předpoklad vhodnosti popisu procesu tímto modelem byl potvrzen měřením přechodové charakteristiky provedeným v kapitole 3.2.

V následujících kapitolách budou popsány použité algoritmy. Pro identifikaci byla použita průběžná identifikace metodou nejmenších čtverců, u návrhu regulátorů polynomiální metoda syntézy řízení. Výhodou této metody je to, že určuje jak strukturu vhodného regulátoru, tak i vztahy pro výpočet jeho parametrů. Při návrhu regulátorů se vychází ze základních požadavků :

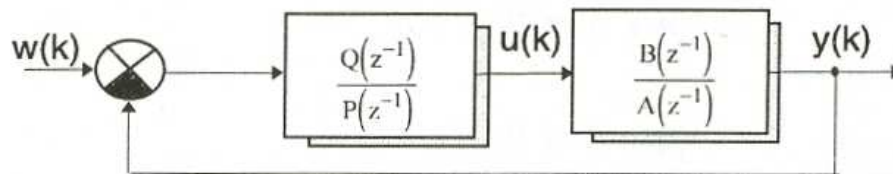
- Stabilita systému řízení
- Vnitřní ryzost systému řízení
- Asymptotické sledování referenčního signálu
- Úplná kompenzace poruchy vstupující do systému řízení

Regulátory byly navrhovány pro řízení tepelné soustavy, kde ohřev TUV probíhá ve výměníku. Byl uvažován jednoduchý výměník tepla bez tepelné kapacity (viz. analytický model výměníku). Proces je řízen elektroregulačním ventilem s lineární charakteristikou. Díky této vlastnosti ventilu odpadají případné problémy s linearizací modelu. Veškeré další použité součásti mají také lineární charakteristiku, a tak můžeme soustavu považovat za lineární.

## 2.2 Návrh 1DOF diskretních regulátorů

### 2.2.1 Návrh diskretního regulátoru založeného na požadavku na průběh přechodového děje spojitě soustavy druhého řádu (1R1)

Při navrhování tohoto regulátoru bylo vycházeno z obecného blokového schématu na (obr.14),[3].



Obr. 14 Blokové schéma regulačního obvodu s regulátorem PID

Přenos diskretní regulované soustavy je dán vztahem:

$$G_p(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \quad (1.10)$$

Polynomy soustavy mají tvar:

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}; \quad B(z^{-1}) = b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} \quad (1.11)$$

Přenos diskretního regulátoru je dán vztahem:

$$G_R(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{Q(z^{-1})}{P(z^{-1})} \quad (1.12)$$

Polynomy regulátoru mají tvar:

$$P(z^{-1}) = (1 - z^{-1})(1 + \gamma z^{-1}); \quad Q(z^{-1}) = q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2} \quad (1.13)$$

Operátorová rovnice regulátoru je dána vztahem :

$$G_p(z) = \frac{Q(z^{-1})}{P(z^{-1})} E(z) \quad (1.14)$$

Dosazením polynomů  $P(z^{-1})$ ,  $Q(z^{-1})$  do operátorové rovnice (1.14), obdržíme vztah pro výpočet akčního zásahu .

$$u(k) = q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2) + (1-\gamma)u(k-1) + \gamma u(k-2) \quad (1.15)$$

Pro přenos řízení uzavřeného regulačního obvodu podle (obr. 14) obdržíme vztah (1.16), kde ve jmenovateli je charakteristický polynom  $D(z^{-1})$  .

$$G_w(z) = \frac{Y(z)}{W(z)} = \frac{B(z^{-1})Q(z^{-1})}{A(z^{-1})P(z^{-1}) + B(z^{-1})Q(z^{-1})} \quad (1.16)$$

$$D(z^{-1}) = A(z^{-1})P(z^{-1}) + B(z^{-1})Q(z^{-1}) \quad (1.17)$$

Volbou určujícího charakteristického polynomu v podmínkové polynomiální rovnici je zadáno předepsané rozložení pólů přenosu řízení (1.16). Požadované chování přechodového děje uzavřeného regulačního obvodu můžeme dosáhnout volbou vlastní kruhové frekvence  $\omega$  a poměrného tlumení  $\xi$  v charakteristické rovnici spojité soustavy 2. řádu[3].

$$s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2 = 0 \quad (1.18)$$

Pokud je polynom  $D(z^{-1})$  ve tvaru (1.19), potom pro periodu vzorkování  $T_0$  je možno odvodit vztahy (1.18) pro výpočet jeho koeficientů.

$$D(z^{-1}) = 1 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} \quad (1.19)$$

$$\begin{aligned} d_1 &= -2 \exp(-\xi\omega T_0) \cos(\omega T_0 \sqrt{1-\xi^2}); & \text{pro } \xi \leq 1 \\ d_1 &= -2 \exp(-\xi\omega T_0) \cosh(\omega T_0 \sqrt{\xi^2-1}); & \text{pro } \xi > 1 \\ d_2 &= \exp(-2\xi\omega T_0) \end{aligned} \quad (1.20)$$

Aby měl polynom  $D(z^{-1})$  stabilní póly, musí platit  $\xi > 0$  a  $\omega > 0$ . Poměrný koeficient tlumení  $\xi$  se může volit podle toho, zda je považován nekmitavý, nebo naopak kmitavý průběh regulačního pochodu. Dosazením konkrétních polynomů do podmínkové rovnice



(1.17), obdržíme soustavu čtyř rovnic o čtyřech neznámých, což jsou parametry navrhovaného regulátoru. Zápis v maticovém tvaru vypadá následovně:

$$\begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 & 1 \\ b_2 & b_1 & 0 & a_1 - 1 \\ 0 & b_2 & b_1 & a_2 - a_1 \\ 0 & 0 & b_2 & -a_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

První matice na levé straně je závislá pouze parametrech regulované soustavy, vedlejší vektor obsahuje neznámé parametry navrhovaného regulátoru, které jsou řešením systému a vektor na pravé straně závisí na počtu pólů  $n_d$  a jejich rozložení v komplexní rovině.

V tomto případě jsou složky vektoru na pravé straně dány vztahy:

$$x_1 = d_1 + 1 - a_1; \quad x_2 = d_2 + a_1 - a_2; \quad x_3 = a_2; \quad x_4 = 0 \quad (1.22)$$

### 2.2.2 Návrh diskrétního regulátoru založeného na požadavku na konkrétní přechodový děj (1R2)

Tento typ regulátoru je navržen na základě požadavku na průběh přechodového děje, který má předepsaný omezený překmit nebo má být úplně bez překmitu. V těchto případech je lepší volit polynom  $D(z^{-1})$  ve tvaru:

$$D(z) = (z - a) [z - (\alpha + j\omega)] [z - (\alpha - j\omega)] \quad (1.23)$$

Charakteristický polynom (1.17) má dvojici komplexně sdružených pólů  $z_{1,2} = \alpha \pm j\omega$  umístěných uvnitř jednotkové kružnice v intervalu  $\alpha^2 + \omega^2 < 1$  a dvojnásobný pól  $z_{3,4} = \alpha$ , přičemž  $0 \leq \alpha \leq 1$ . Volbou parametru  $\alpha$  můžeme měnit rychlost přechodového děje regulačního procesu a rovněž velikost akční veličiny. Změnou parametru  $\omega$  je možná volba požadovaného překmitu. Levá strana rovnic je stejná s předchozím typem, pouze se liší parametry na pravé straně rovnice, a jsou dány vztahy:

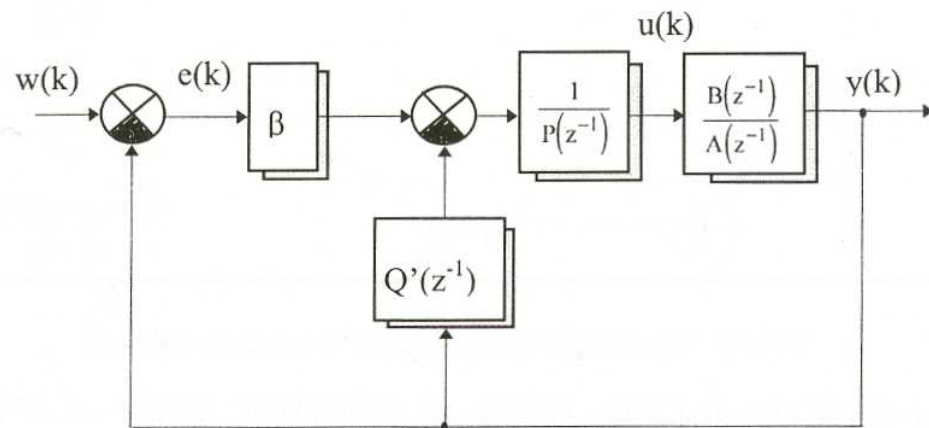
$$x_1 = c + 1 - a_1; \quad x_2 = d + a_1 - a_2; \quad x_3 = f + a_2; \quad x_4 = g \quad (1.24)$$

$$c = -4\alpha; \quad d = 6\alpha^2 + \omega^2; \quad f = -2\alpha(2\alpha^2 + \omega^2); \quad g = \alpha^2(\alpha^2 + \omega^2) \quad (1.25)$$

## 2.3 Návrh 2DOF diskrétních regulátorů

### 2.3.1 Návrh diskrétního regulátoru založeného na požadavku na průběh přechodového děje spojitě soustavy druhého řádu (2R1)

Struktura 2DOF regulačního obvodu je znázorněna na obrázku (15),[3]. Tento obvod obsahuje dvě zpětné vazby.



Obr. 15 Blokové schéma s 2DOF regulátorem

Operátorová rovnice má potom tvar:

$$U(z) = \left[ \beta E(z) - Q(z^{-1})Y(z) \right] \frac{1}{P(z^{-1})} \quad (1.26)$$

Polynomy navrhovaného regulátoru budou ve tvaru:

$$P(z^{-1}) = (1 - z^{-1})(1 + \gamma z^{-1}) \text{ a } Q(z^{-1}) = (q_0 - q_2 z^{-1}) \quad (1.27)$$

Polynomy přenosu  $G_s$  jsou přitom ve tvaru (1.11). Po dosazení těchto polynomů do operátorové rovnice (1.24) dostaneme vztah pro výpočet akčního zásahu:

$$u(k) = \left[ (q_0 + \beta) y(k) - (q_0 + q_2) y(k-1) + q_2 y(k-2) \right] - \\ - (\gamma - 1) u(k-1) + \gamma u(k-2) + \beta w(k) \quad (1.28)$$

Pro přenos řízení uzavřeného regulačního obvodu podle Obr. (15) platí:

$$G_w(z) = \frac{Y(z)}{W(z)} = \frac{B(z^{-1})Q(z^{-1})}{A(z^{-1})P(z^{-1}) + B(z^{-1})[Q(z^{-1}) + \beta]} \quad (1.29)$$

Takže podmínková polynomiální rovnice bude ve tvaru:

$$A(z^{-1})P(z^{-1}) + B(z^{-1})[Q(z^{-1}) + \beta] = D(z^{-1}) \quad (1.30)$$

Po dosazení výše uvedených polynomů bude získána opět soustava čtyř lineárních algebraických rovnic o čtyřech neznámých, což jsou parametry navrženého regulátoru.

Soustava rovnic v maticovém zápisu:

$$\begin{bmatrix} b_1 & 0 & b_1 & 1 \\ b_2 - b_1 & -b_1 & b_2 & a_1 - 1 \\ b_2 & b_2 - b_1 & 0 & a_2 - a_1 \\ 0 & b_2 & 0 & -a_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_2 \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (1.31)$$

Parametry regulátoru získáme tak, že do podmínkové rovnice (1.30) dosadíme polynom  $D(z^{-1})$  ve tvaru (1.19). Jednotlivé složky vektoru na pravé straně maticové rovnice (1.31)

budou ve tvaru:

$$x_1 = d_1 + 1 - a_1; \quad x_2 = d_2 + a_1 - a_2; \quad x_3 = -a_2; \quad x_4 = 0 \quad (1.32)$$

Řešením systému rovnic jsou hledané parametry navrhovaného regulátoru, přičemž vztahy pro  $d_1$  a  $d_2$  se vypočítají podle vztahů (1.20).

### 2.3.2 Návrh diskrétního regulátoru založeného na požadavku na konkrétní přechodový děj (2R2)

U tohoto typu regulátoru dosadíme do podmínkové rovnice (1.23) za polynom  $D(z^{-1})$  vztah (1.14), přičemž jednotlivé složky vektoru na pravé straně systému rovnic (1.33) jsou:

$$x_1 = c + 1 - a_1; \quad x_2 = d + a_1 - a_2; \quad x_3 = f + a_2; \quad x_4 = g \quad (1.33)$$

kde parametry jsou ve tvaru.

$$c = -4\alpha; \quad d = 6\alpha^2 + \omega^2; \quad f = -2\alpha(2\alpha^2 + \omega^2); \quad g = \alpha^2(\alpha^2 + \omega^2) \quad (1.34)$$

## 2.4 PSD regulátor

Algoritmus PSD regulátoru je obecně velmi rozšířený a je uveden snad v každé literatuře zabývající se automatickým řízením [2],[3],[5]. Zde bude uveden pouze přírůstkový algoritmus PSD regulátoru, který byl použit v této práci.

$$u(k) - u(k-1) = r_0 \left( 1 + \frac{T_d}{T} + \frac{T}{T_i} \right) e(k) - r_0 \left( 1 + 2 \frac{T_d}{T} \right) e(k-1) + r_0 \frac{T_d}{T} e(k-2) \quad (1.35)$$

Rovnici je možné upravit na tvar:

$$u(k) - u(k-1) = q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2)$$

kde (1.36)

$$q_0 = r_0 \left( 1 + \frac{T_d}{T} + \frac{T}{T_i} \right) \quad q_1 = -r_0 \left( 1 + 2 \frac{T_d}{T} \right) \quad q_2 = r_0 \frac{T_d}{T} .$$

Akční zásah  $u(k)$  je funkcí současné regulační odchylky, předcházející regulační odchylky, před-předcházející regulační odchylky a předcházejícího akčního zásahu.

$$u(k) = f[e(k), e(k-1), e(k-2), u(k-1)] \quad (1.37)$$

## 2.5 Průběžná identifikace rekurzivní metodou nejmenších čtverců

Pro použití samočinně se nastavujícího regulátoru není možné použít pro výpočet odhadů parametrů modelu procesu klasickou verzi ARX modelu, ale musíme použít jeho rekurzivní verzi vhodnou pro identifikaci v reálném čase. Při této modifikaci se používají nově naměřené hodnoty pouze pro opravu (korekci) původních odhadů, čímž klesá výpočetní složitost identifikačních algoritmů. Rekurzivní algoritmy umožňují sledovat změny vlastností (parametrů) procesu v reálném čase, a proto jsou základem samočinně se nastavujících regulátorů[3].

Nechť lineární jednorozměrný stochastický model je popsán modelem ARX. O neměřitelné náhodné složce  $e_s(k)$  předpokládáme, že je posloupností vzájemně nekorelované náhodné veličiny a rovněž nekorelované se vstupem a výstupem procesu. Dále předpokládáme, že náhodná veličina má nulovou střední hodnotu a konstantní kovarianci (rozptyl). Výhodou rekurzivní metody nejmenších čtverců je ta skutečnost, že potřebuje nejmenší objem apriorních informací o náhodné složce  $e_s(k)$ .

Naším úkolem je průběžně odhadovat neznámé parametry  $\Theta$  modelu na základě vstupů a výstupů k časovému okamžiku  $k$ ,  $\{y(i), u(i), i = k, k - 1, k - 2, \dots, k_0\}$  ( $k_0$  je počáteční čas identifikace). Hledáme takový vektor  $\hat{\Theta}$  o rozměru  $n_z = 2n$ , který minimalizuje kritérium

$$J_k(\Theta) = \sum_{i=k_0}^k e_s^2(i), \quad (1.38)$$

kde

$$e_s(i) = y(i) - \Theta^T \phi(i) = [1 - \Theta^T] \begin{bmatrix} y(i) \\ \phi(i) \end{bmatrix}. \quad (1.39)$$

Jestliže požadujeme, aby algoritmus byl schopen sledovat pomalé změny parametrů identifikovaného procesu, můžeme toho dosáhnout technikou exponenciálního zapomínání. Potom minimalizujeme modifikované kritérium

$$J_k(\Theta) = \sum_{i=k_0}^k \varphi^{2(k-i)} e_s^2(i), \quad (1.40)$$

kde  $0 < \varphi^2 \leq 1$  je faktor exponenciálního zapomínání.

$$J_k(\Theta^T) = [1 - \Theta^T] V(k) \begin{bmatrix} 1 \\ -\Theta \end{bmatrix}. \quad (1.41)$$

V této práci je využit algoritmus směrového zapomínání, kdy se standardní exponenciální zapomínání aplikuje pouze na data přinášející novou informaci. Vektor odhadu parametrů se aktualizuje podle rekurzivního vztahu

$$\hat{\Theta}(k) = \hat{\Theta}(k-1) + \frac{C(k-1)\phi(k-1)}{1 + \xi(k-1)} \hat{e}(k-1), \quad (1.42)$$

kde

$$\xi(k-1) = \phi^T(k-1)C(k-1)\phi(k-1) \quad (1.43)$$

je pomocný skalár a

$$\hat{e}(k) = y(k) - \hat{\Theta}^T(k)\phi(k-1) \quad (1.44)$$

je chyba predikce. Jestliže  $\xi(k) > 0$ , potom čtvercová kovarianční matice o rozměru  $n \times n$  je aktualizována podle vztahu

$$C(k) = C(k-1) - \frac{C(k-1)\phi(k-1)\phi^T(k-1)C(k-1)}{\varepsilon^{-1}(k) + \xi(k-1)}, \quad (1.45)$$

kde

$$\varepsilon(k) = \varphi(k) - \frac{1 - \varphi(k)}{\xi(k-1)}, \quad (1.46)$$

Jestliže  $\xi(k-1) = 0$ , potom

$$C(k) = C(k-1). \quad (1.47)$$

Hodnota adaptivního směrového zapomínání  $\varphi(k)$  je potom počítána v každé periodě vzorkování podle vztahu

$$\varphi(k) = \left\{ \begin{array}{l} 1 + (1 + \rho) [\ln(1 + \xi(k-1))] + \\ + \left[ \frac{(v(k-1) + 1)\eta(k-1)}{1 + \xi(k-1) + \eta(k-1)} - 1 \right] \frac{\xi(k-1)}{1 + \xi(k-1)} \end{array} \right\}^{-1}, \quad (1.48)$$

kde

$$\begin{aligned} \eta(k) &= \frac{\hat{e}^2(k)}{\lambda(k)} \\ v(k) &= \varphi(k) [(v(k-1) + 1)] \\ \lambda(k) &= \varphi(k) \left[ \lambda(k-1) + \frac{\hat{e}(k-1)}{1 + \xi(k-1)} \right] \end{aligned} \quad (1.49)$$

jsou pomocné proměnné. Pro start algoritmu se osvědčilo vhodné zvolit následující počáteční podmínky: Prvky hlavní diagonály kovarianční matice  $C_{ii}(0) = 10^3$ , počáteční hodnota faktoru směrového zapomínání  $\varphi(0) = 1$ ,  $\lambda(0) = 0.001$ ,  $v(0) = 10^{-6}$ ,  $\rho = 0.99$ . Volba počátečních odhadů vektoru parametrů  $\hat{\Theta}(0)$  byla u jednotlivých experimentů provedena buď s apriorní informací nebo bez ní.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

### 3 EXPERIMENTY A REGULACE NA SOUSTAVĚ TUV

#### 3.1 Popis soustavy

Soustava TUV se skládá z pájeného výměníku ALFA LAVAL, elektroregulačního ventilu firmy Siemens s označením MXG 461. Dále je zde přívod studené vody a čerpadlo Wilo pro zajištění cirkulace TUV. Na vstupu a výstupu z výměníku jsou osazeny odporové měřicí čidla. Při svém normálním provozu jsou čidla a regulační ventil připojena do regulátoru TRONIC 2008E, který zajišťuje regulaci teploty TUV na žádanou teplotu. Teplota je řízena regulací průtoku horké vody na primární straně výměníku. Při provádění experimentů a při návrzích řídicích algoritmů byla čidla připojena na měřicí kartu Advantech 1711. Všechny návrhy a realizace řízení byly prováděny v Matlabu, zejména pak v jeho nástavbě Simulinku. Pro realizaci reálných měření na soustavě byl do Matlabu doinstalován Real Time Toolbox. Tato nástavba v sobě zahrnuje přímo ovladače karet Advantech, čímž je umožněn okamžitý přístup ke všem vnějším analogovým a digitálním signálům.

##### 3.1.1 Popis měřených signálů

Jelikož odporová čidla mění svůj odpor v závislosti na teplotě a měřicí karta má analogové napěťové vstupy z rozsahem -10 až 10V, musel být mezi čidlo a kartu vřazen převodník teplota-napětí, který má výstup 0 až 10V, čemuž odpovídá teplota 0 až 100°C. V Simulinkových zapojeních je tato hodnota reprezentována rozsahem -1 až 1, takže například teplotě 50°C odpovídala hodnota 0,5.

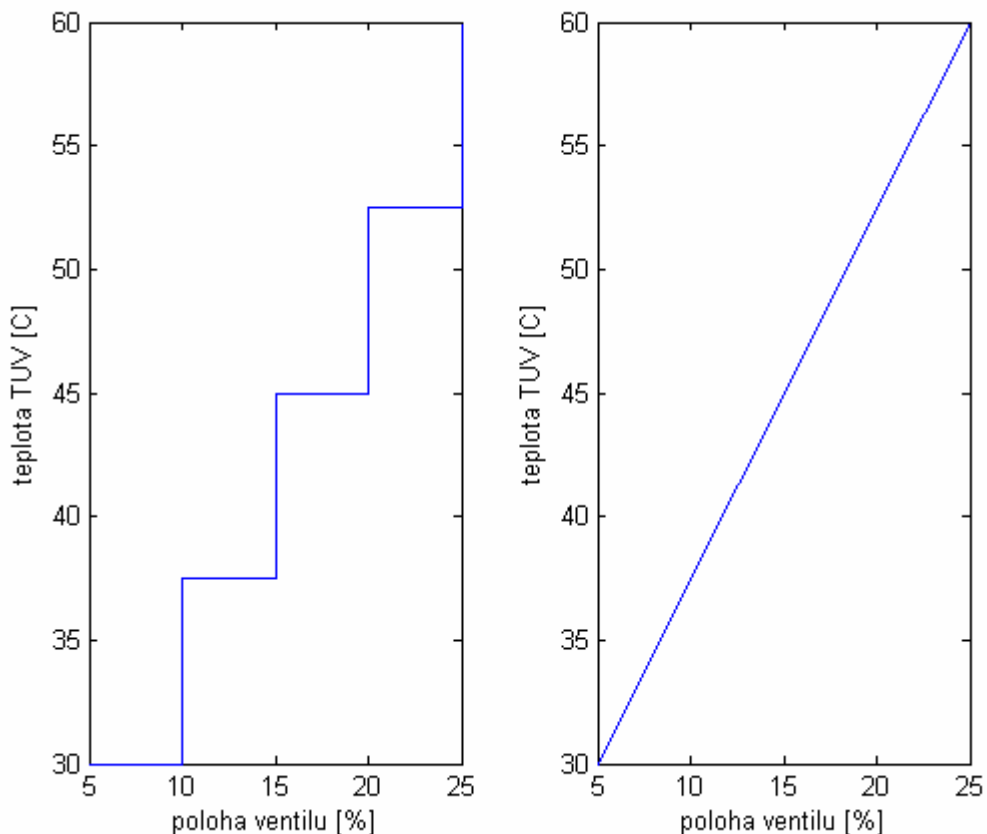
Výstupní napětí měřicí karty na analogových výstupech je 0 až 10V a vstupní signál řídicího ventilu se dá nakonfigurovat taktéž na hodnotu 0 až 10V, tak zde není třeba signály jakkoliv přizpůsobovat a ventil se dá připojit přímo na výstup karty. V Simulinkových zapojeních hodnotě 0 až 10V odpovídá hodnota 0 až 1. Problém nastává až při odeslání hodnoty na výstup karty kde hodnotě 0 až 10V odpovídá rozsah -1 až 1, takže opět příklad hodnotě 2V odpovídala hodnota -0,8. Pokud v Simulinkovém schématu vznikla při regulaci odchylka a regulátor spočítal akční zásah a poslal na ventil hodnotu 0,2 této hodnotě by neodpovídalo napětí 2V, ale 6V. Z tohoto důvodu byla do schématu vřazena funkce, která prováděla přepočítání na odpovídající hodnotu.



### 3.2 Charakteristiky soustavy

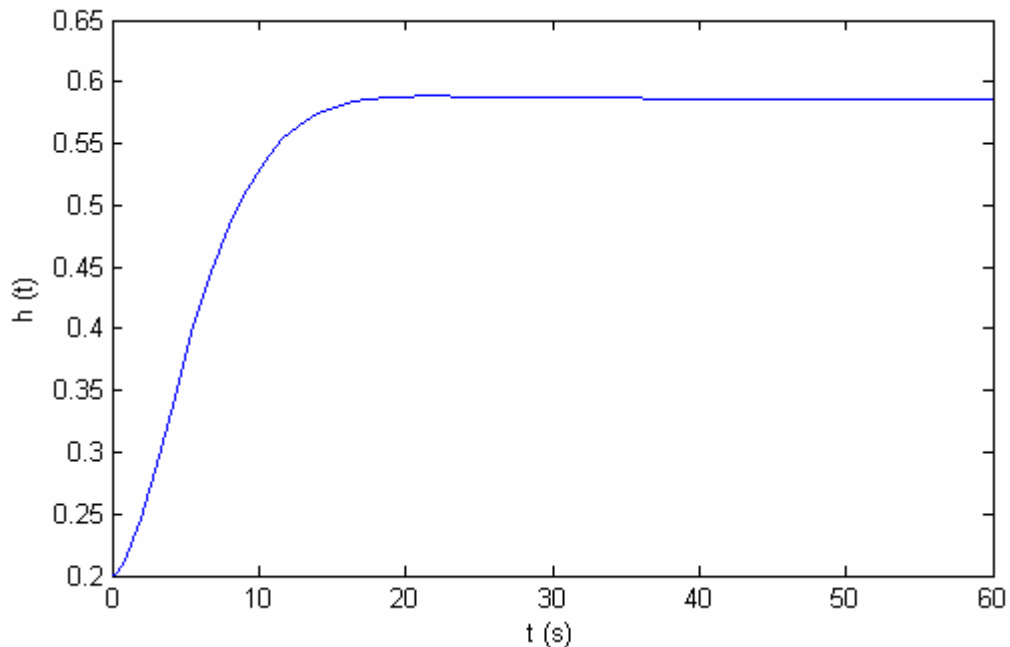
Pro získání vlastností soustavy byly změřeny charakteristiky soustavy. Při normálním provozu se poloha ventilu pohybuje v rozmezí 5 až 20% a žádaná teplota TUV je v rozmezí 50 až 55°C. Proto měřené charakteristiky byly prováděny v okolí těchto hodnot, a také se jedná o reálné zařízení na kterém není dost dobře možné změřit celou statickou a dynamickou charakteristiku (při teplotě horkovodu 90°C a při 100% otevření ventilu by se do rozvodů TUV dostala voda o teplotě blízké horkovodu, což je z bezpečnostních a provozních důvodů nepřijatelné).

Při měření statické charakteristiky byl postupně skokově otevírán ventil a naměřené údaje zaznamenány do grafu. Z grafu je na první pohled patrné, že se jedná o lineární systém.



Obr. 16 Statická charakteristika

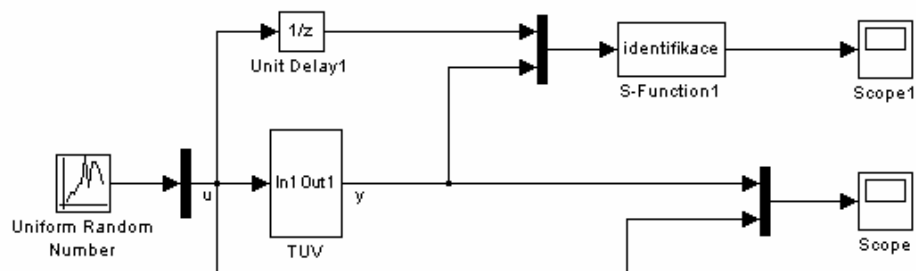
Přechodová charakteristika byla měřena tak, že byl zastaven ohřev TUV, a při dosažení teploty 20°C byl skokově otevřen ventil z nuly na 22%. Na základě charakteristiky byl stanoven řád soustavy a soustava je dále uvažována jako soustava druhého řádu.



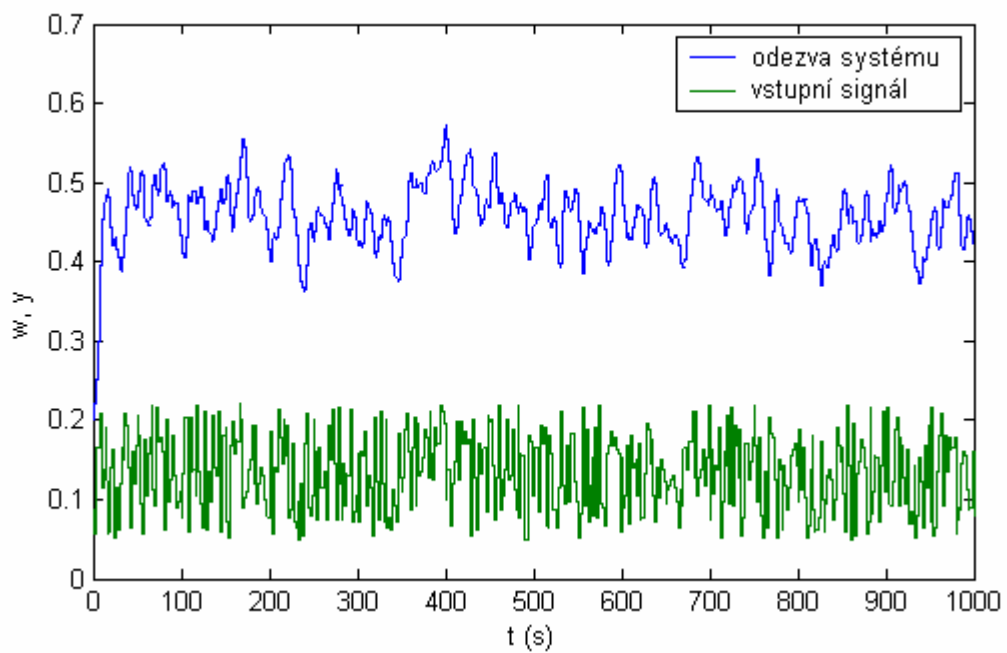
Obr. 17 Přechodová charakteristika

### 3.3 Identifikace soustavy

Při identifikaci byla soustava buzena náhodným signálem. Perioda náhodného signálu byla volena na základě přechodové charakteristiky. Parametry jsou využívány pro řízení s regulátory, které mají pevně nastavenými parametry. Jako identifikační algoritmus je volena jednorázová metoda nejmenších čtverců. Soustava byla buzena náhodným signálem s periodou  $T = 2s$ , a frekvence vzorkování diskretní identifikace byla nastavena na  $T_v = 2s$ .



Obr. 18 Schéma identifikačního obvodu



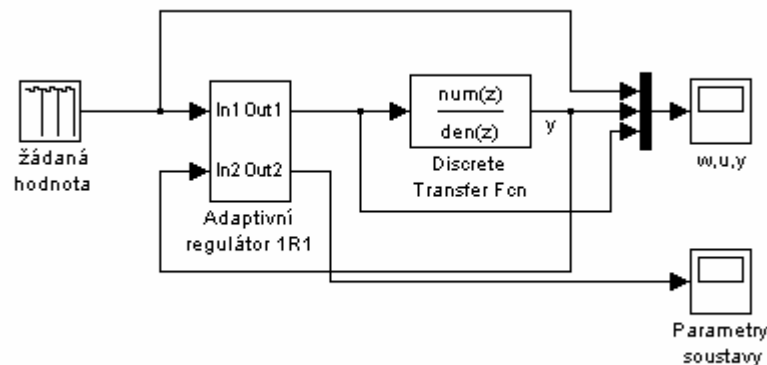
Obr. 19 Odezva systému na náhodný signál

Hodnoty diskretních parametrů získaných jednorázovou metodou nejmenších čtverců:

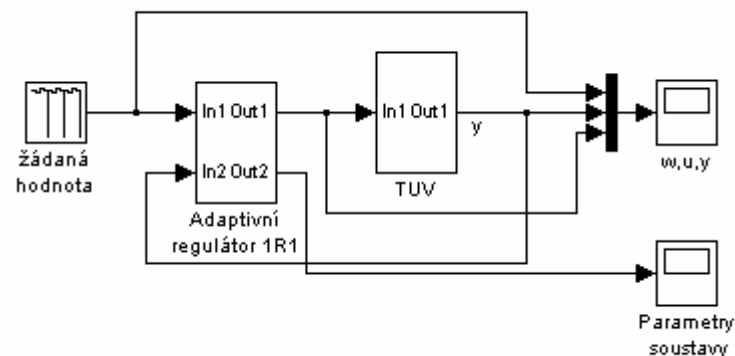
$$a_0 = -1.0512 \quad a_1 = 0.0718 \quad b_0 = -0.0137 \quad b_1 = 0.0704$$

### 3.4 Řízení teploty TUV

Regulace byly prováděny z důvodu ověření funkčnosti navržených algoritmů řízení a jsou spíše demonstrativní. Všechny regulátory byly realizovány pomocí S-funkcí [6] v Matlabu, které umožňují implementaci vlastních bloků do simulinkových modelů. Schéma regulačního obvodu je uvedeno na obrázku (Obr. 20). Při řízení soustavy TUV byla diskrétní přechodová funkce nahrazena blokem pro komunikaci s reálným systémem (Obr. 21).



Obr. 20 Schéma simulacího regulačního obvodu



Obr. 21 Schéma regulačního obvodu pro řízení soustavy TUV

Popis jednotlivých členů obvodu:

**Žádaná hodnota** – zadání referenčního signálu (žádané hodnoty)

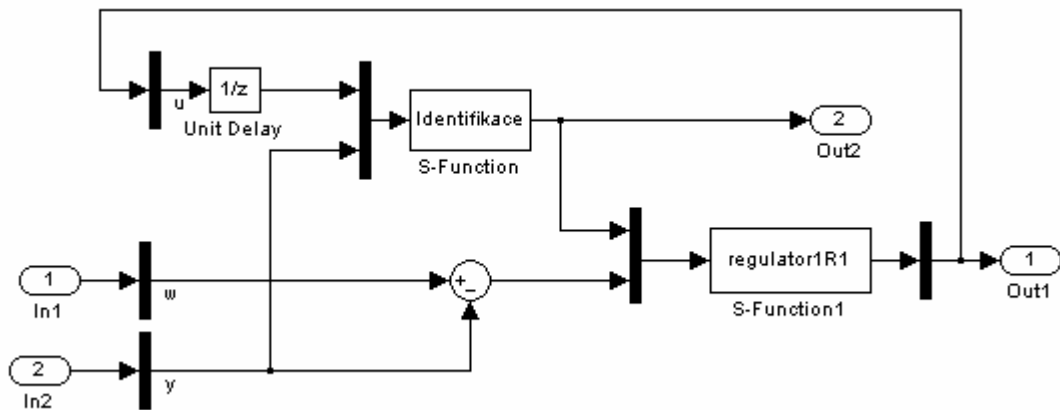
**Adaptivní regulátor 1R1** – obvod regulátoru s identifikací s možností zadávání parametrů regulátoru a identifikace (viz Obr. 24). Na obrázku (Obr. 22) je zobrazeno vnitřní zapojení bloku regulátoru.

**TUV** – slouží ke komunikaci s reálným systémem, vnitřní zapojení je na obrázku (Obr. 23)

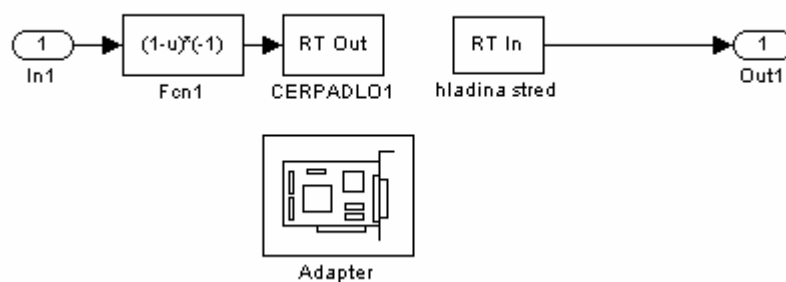
**Parametry soustavy** – vykreslení průběhu identifikovaných parametrů

**w,u,y** – vykreslení průběhu regulačního pochodu

Při řízení realizovaném pomocí regulátorů s pevně nastavenými parametry odpadá blok s identifikací.



Obr. 22 Vnitřní zapojení bloku Adaptivního regulátoru 1R1



Obr. 23 Vnitřní zapojení bloku TUV

Block Parameters: Adaptivní regulátor 1R1

Subsystem (mask)

Parameters

Tv

0.5

Theta

[-1.0514 0.07184 -0.013656 0.07036]

C0

1000\*eye(4)

fi0

1

ny0

1e-6

la0

0.001

rho0

0.99

ksi

1

omega

0.06

sat

[0 1]

OK Cancel Help Apply

Obr. 24 Nastavitelné parametry regulátoru

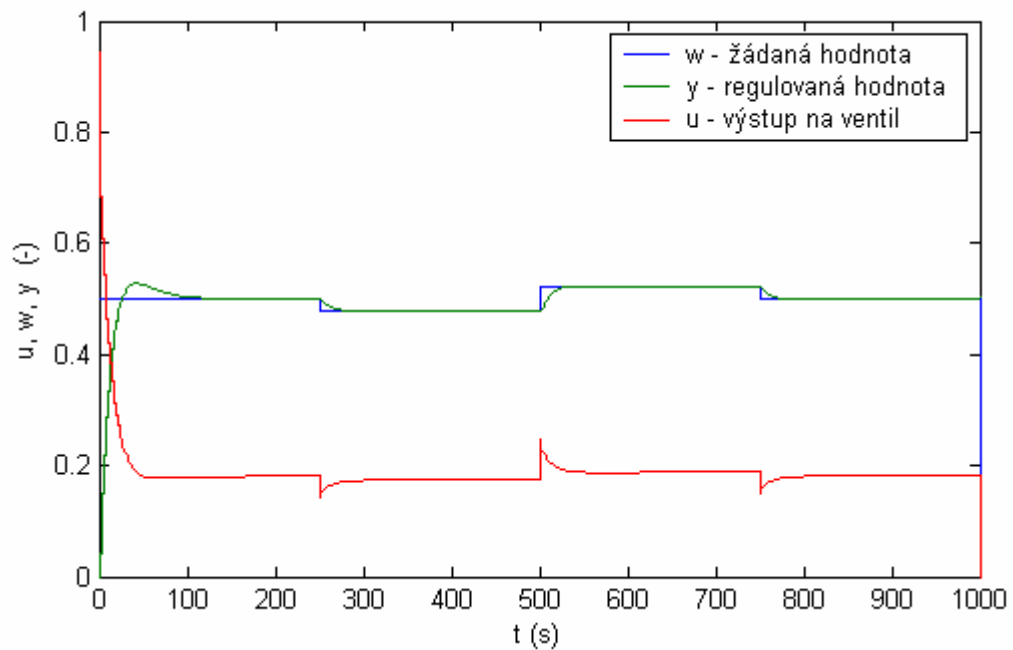
Parametry z menu regulátoru jsou popsány v tabulce (Tab. 3). U různých typů regulátorů jsou nastavitelné parametry pochopitelně odlišné.

Parametry	Popis
Tv	Perioda vzorkování
Theta	Počáteční parametry řízené soustavy
CO	Nastavení kovarianční matice
rho	Vstupní parametr pro algoritmus identifikace $\rho$
la0	Vstupní parametr pro algoritmus identifikace $\lambda$
ny0	Vstupní parametr pro algoritmus identifikace $v$
ksi	Poměrný koeficient tlumení $\xi$
omega	Vlastní kruhová frekvence $\omega$
sat	Omezení akčního zásahu (saturace)

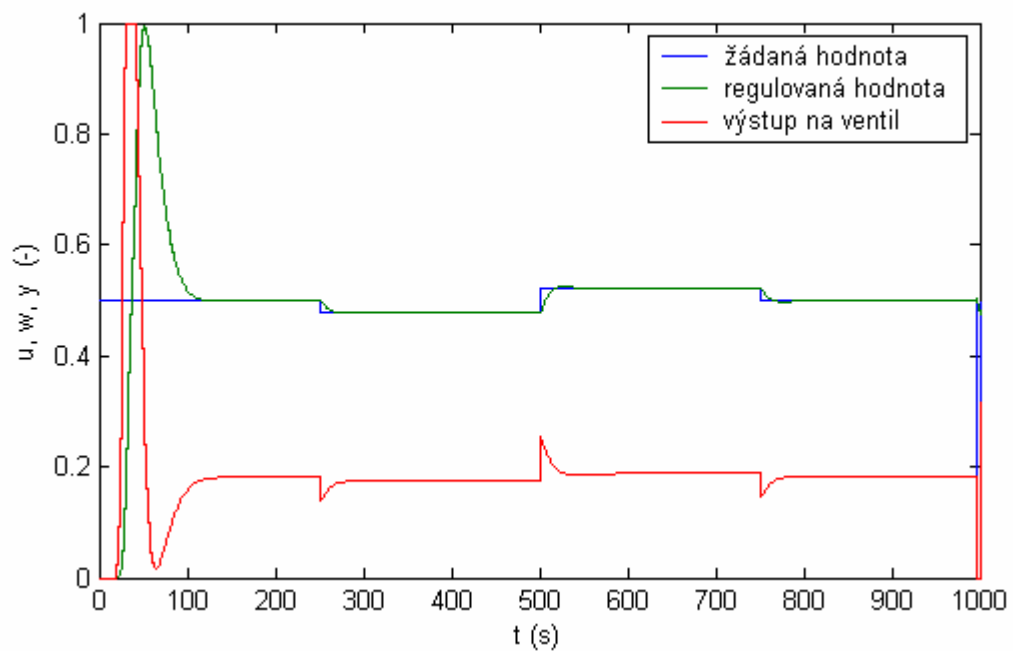
Tab. 3 Popis stavitelných parametrů

### 3.4.1 Simulace řízení

Před řízením reálné soustavy ohřevu TUV byly navržené algoritmy simulačně ověřeny v Matlabu. Jak se později ukázalo, při řízení ohřevu TUV v době kdy jsou parametry soustavy konstantní, tak výsledné průběhy simulací byly velmi podobné s průběhům regulací na reálné soustavě. Pro start adaptivních algoritmů byly počáteční hodnoty vektoru parametrů nastaveny na  $\hat{\Theta} = [0.1; 0.2; 0.3; 0.4]$ .

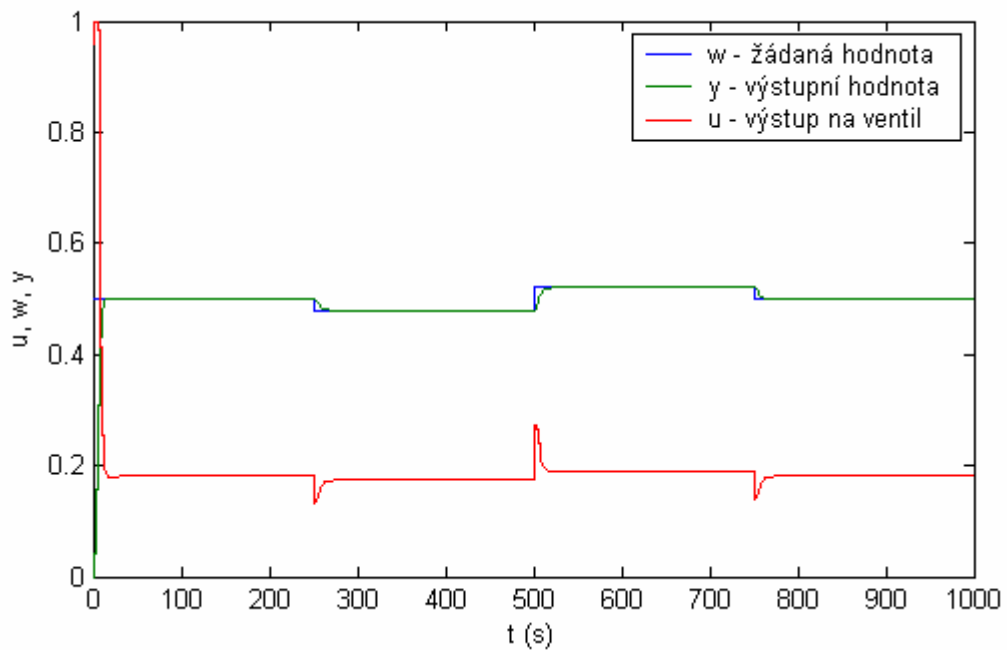


Obr. 25 Simulace regulace s 1DOF regulátorem

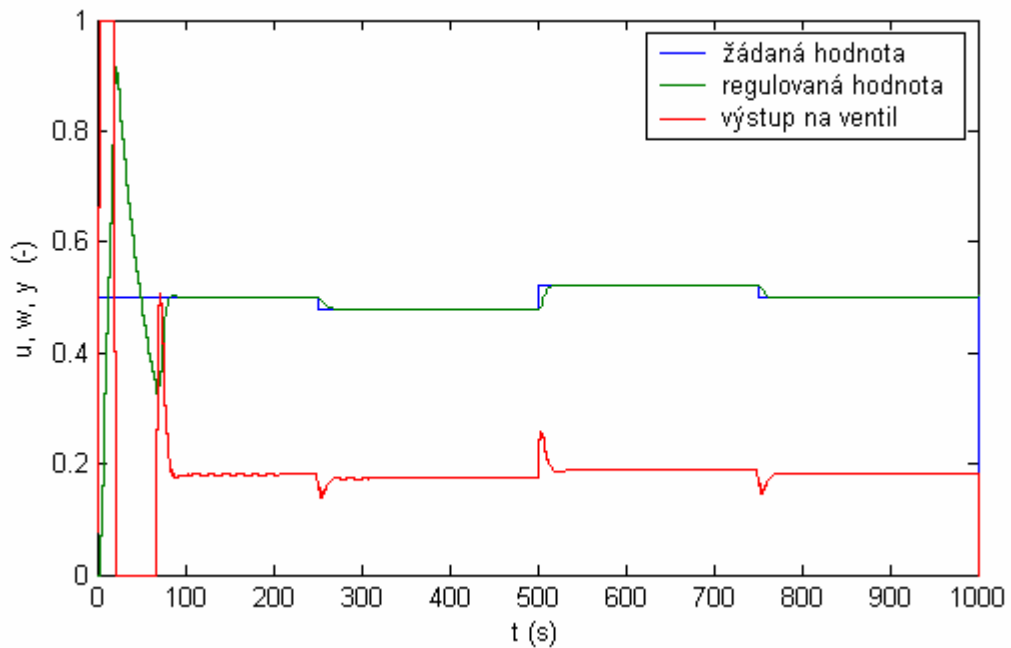


Obr. 26 Simulace regulace s adaptivním 1DOF regulátorem





Obr. 27 Simulace regulace s 2DOF regulátorem



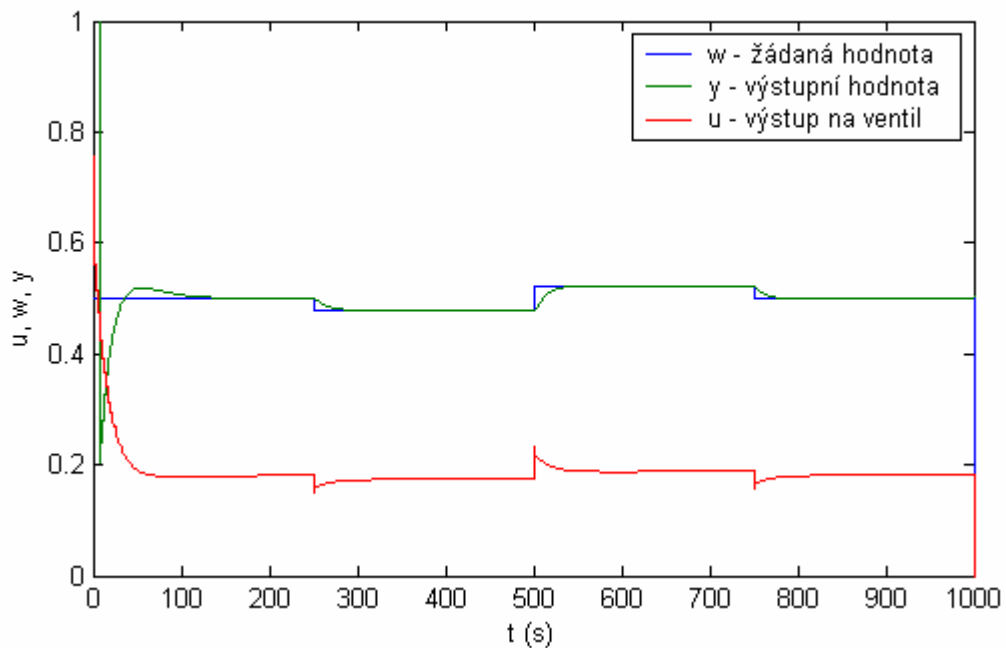
Obr. 28 Simulace regulace s adaptivním 2DOF regulátorem

### 3.4.2 Řízení pomocí diskrétních regulátorů s 1DOF konfigurací

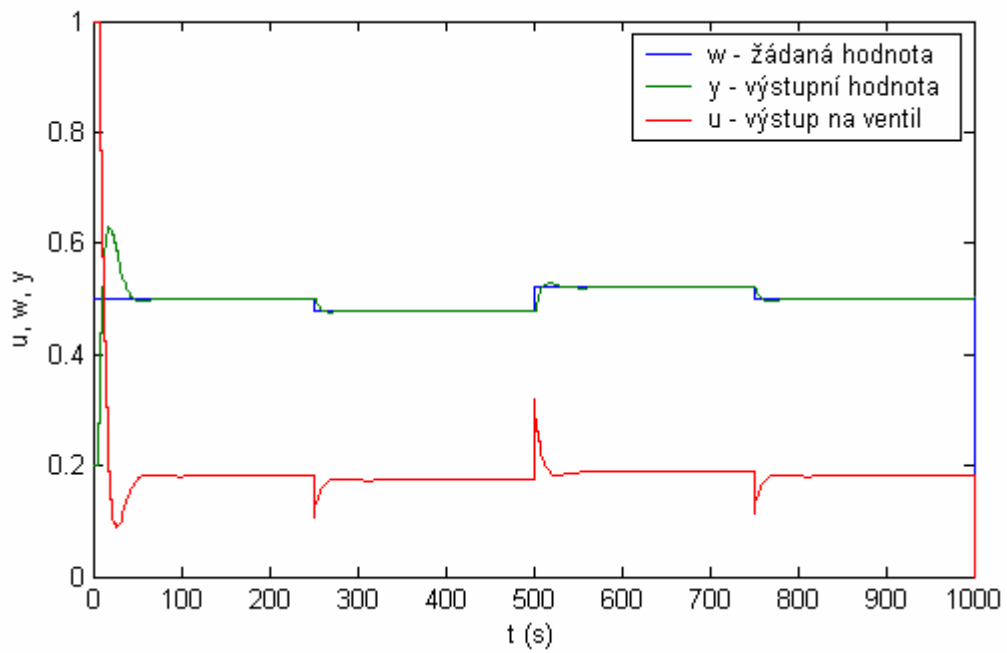
Na prvním obrázku (Obr. 29) je uveden průběh regulace reálné soustavy s PSD regulátorem, z průběhu je zřejmé, že regulace je bezproblémová a průběh regulované

veličiny je srovnatelný s regulátory navrženými pomocí polynomiálních metod. Na obrázku (Obr. 30) je průběh regulace s 1R1 regulátorem. U tohoto typu regulátoru je možné průběh regulované veličiny ovlivňovat volbou vlastní kruhové frekvence  $\omega$  a poměrného tlumení  $\xi$ .

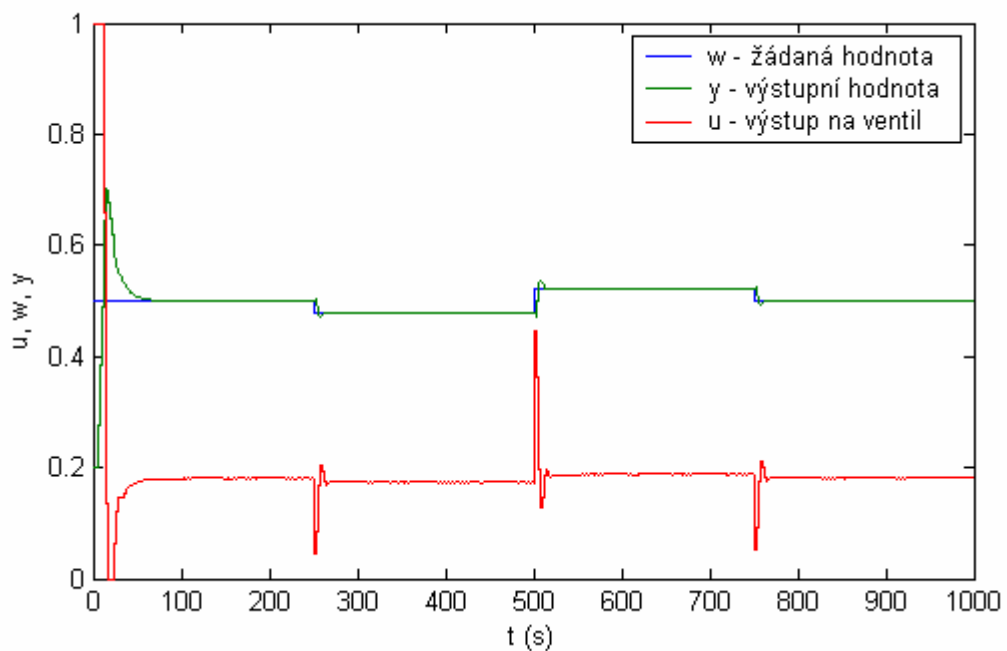
Níže uvedené průběhy byly realizovány regulátorem 2R1 – (Obr. 31, 32). U tohoto typu regulátoru je pochod řízení nejvíce ovlivněn parametrem  $\alpha$ . Je možno pomocí tohoto parametru měnit rychlost přechodového děje a rovněž velikost změn akční veličiny. Při použití tohoto regulátoru bylo dosaženo lepších výsledků než s použitím 1R1. Regulátor rychleji kompenzoval změnu žádané hodnoty, na druhou stranu zde nebylo možné odstranit počáteční překmit. Perioda vzorkování byla nastavena na  $T_v = 2s$ , a perioda aktualizace vstupů a výstupů je  $T = 1s$ . Při volbě parametru  $\alpha$  blízcího se k jedné se regulační obvod choval tlumeněji.



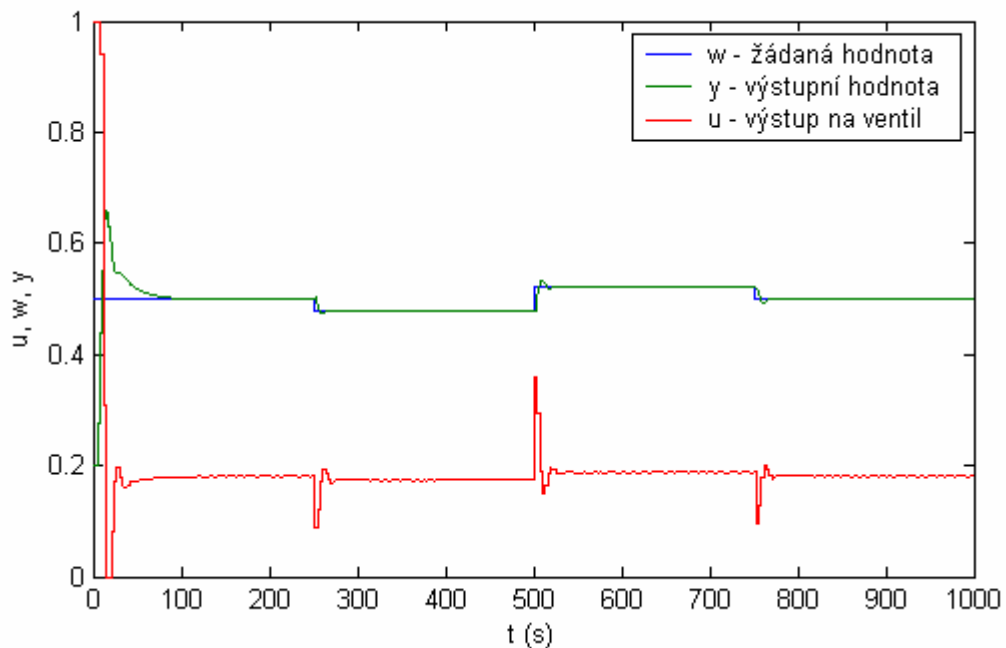
Obr. 29 Průběh regulace s PSD regulátorem



Obr. 30 Průběh regulace:  $\omega = 0,03$ ;  $\zeta = 2$



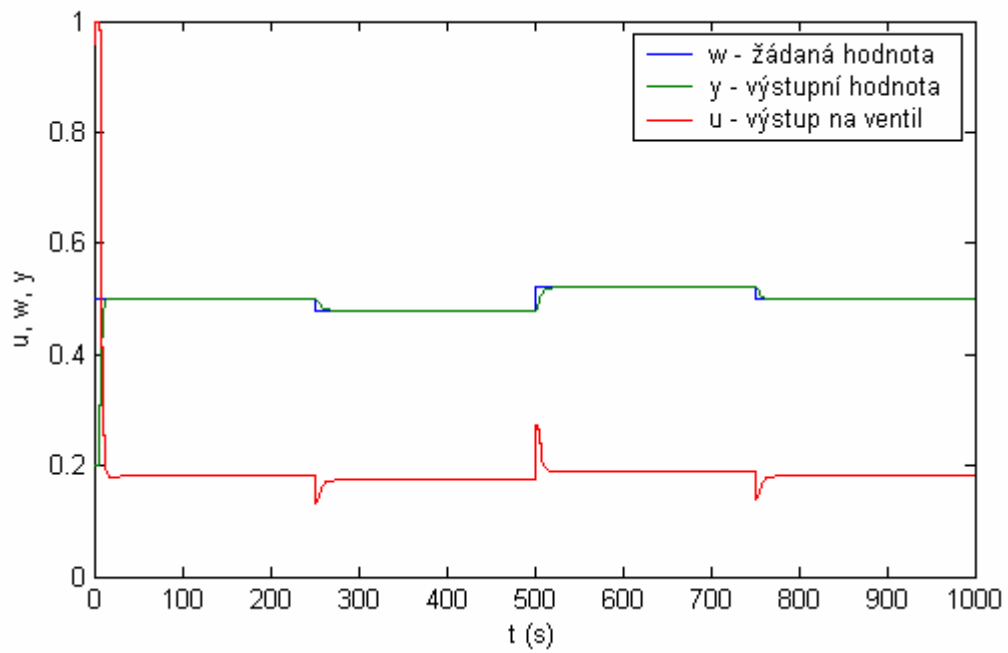
Obr. 31 Průběh regulace:  $\omega = 0,05$ ;  $\zeta = 1$ ;  $\alpha = 0,55$



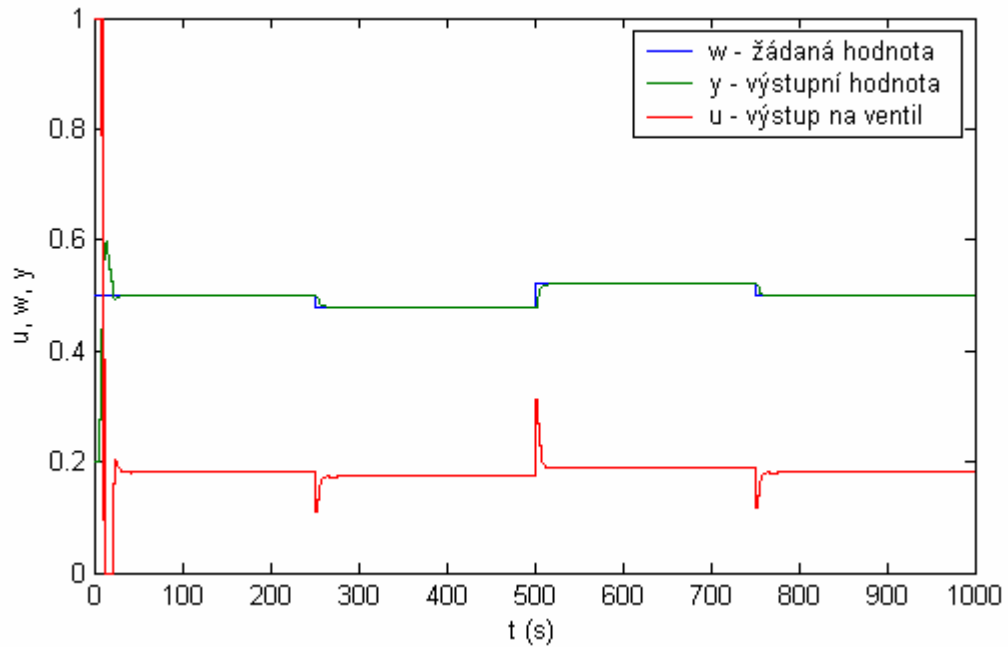
Obr. 32 Průběh regulace :  $\omega = 0,05$ ;  $\zeta = 1$ ;  $\alpha = 0,75$

### 3.4.3 Řízení pomocí diskrétních regulátorů s 2DOF konfigurací

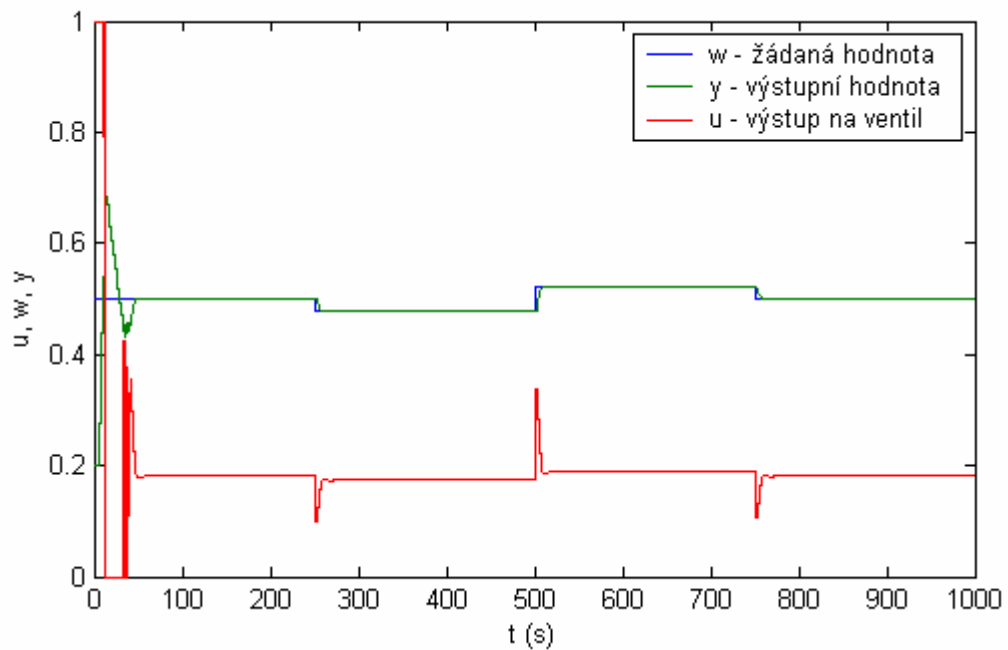
Uvedené průběhy jsou výsledkem řízení regulátorem 1R2 a 2R2. Průběh regulačního pochodu je možno upravit nastavením vlastní frekvence  $\omega$ , koeficientem tlumení  $\zeta$  a u 2R2 regulátorů i parametrem  $\alpha$ . Vhodným nastavením lze odstranit počáteční překmit lépe než u regulátorů s 1DOF konfigurací. Perioda vzorkování byla nastavena na  $T_v = 1s$ . Z uvedených průběhů je patrný vliv jednotlivých parametrů regulátoru na řízený proces. Při realizaci simulace řízení bylo zjištěno že regulátory s 2DOF konfigurací se lépe nastavují a lépe reagují na změny žádané hodnoty.



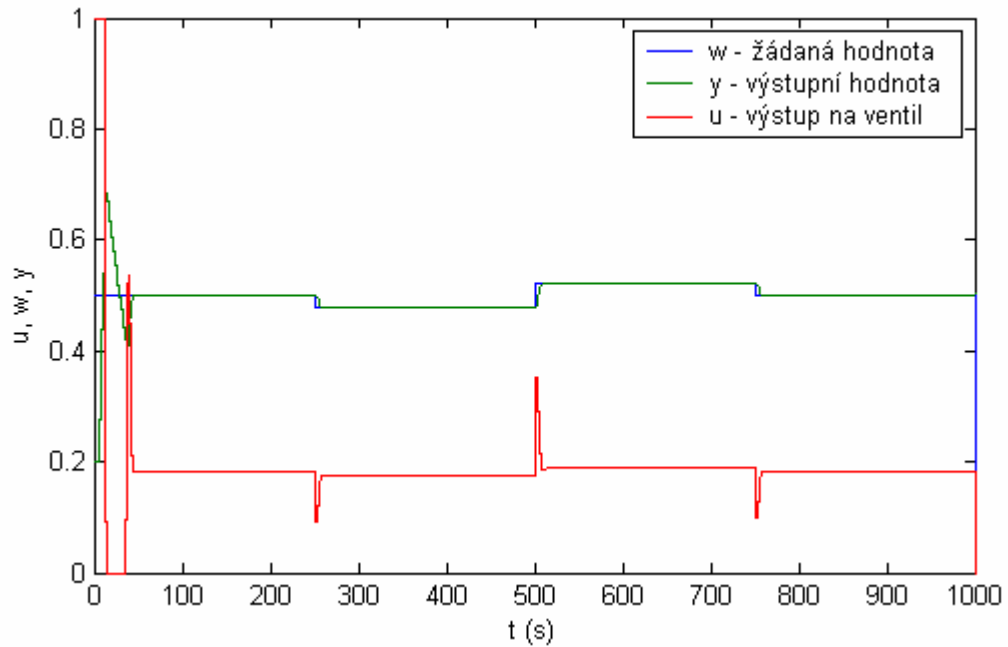
Obr. 33 Průběh regulace:  $\omega = 0,4$ ;  $\zeta = 1$



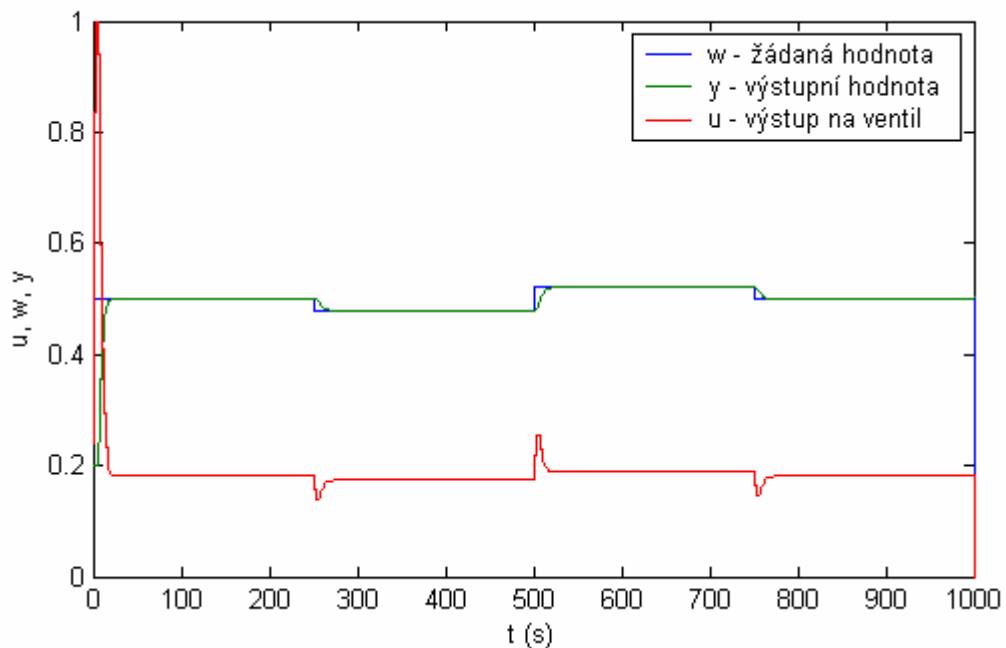
Obr. 34 Průběh regulace:  $\omega = 0,5$ ;  $\zeta = 1$



Obr. 35 Průběh regulace:  $\omega = 0,4$ ;  $\zeta = 1,5$



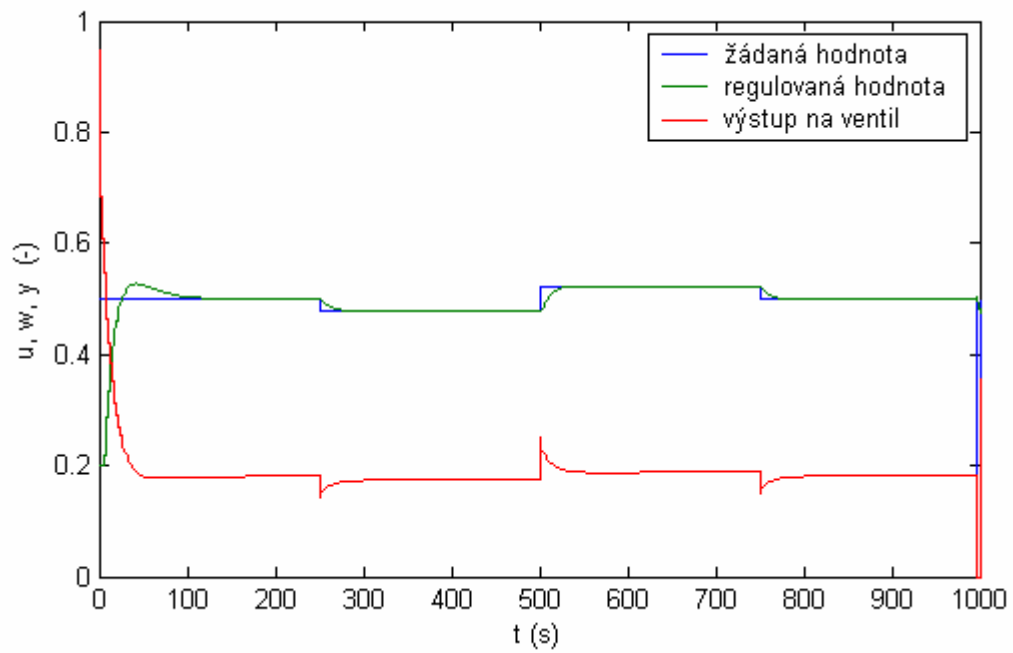
Obr. 36 Průběh regulace:  $\omega = 0,3$ ;  $\zeta = 1$ ;  $\alpha = 0,4$



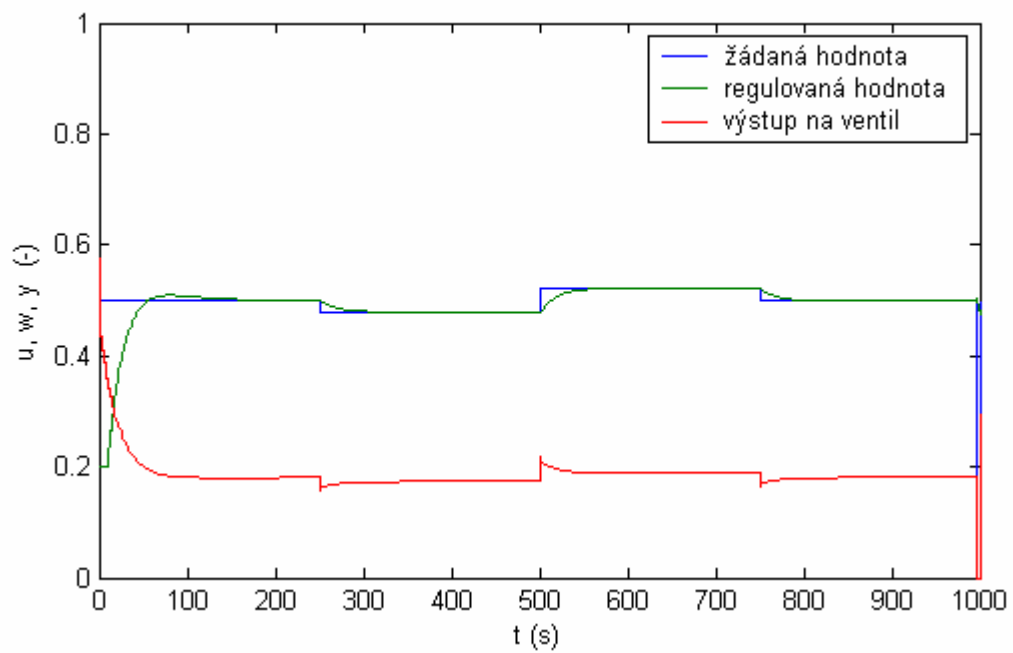
Obr. 37 Průběh regulace:  $\omega = 0,1$ ;  $\zeta = 1$ ;  $\alpha = 0,6$

#### 3.4.4 Řízení pomocí adaptivních diskrétních regulátorů s 1DOF konfigurací

Z uvedeného je patrné, že při reálném řízení bylo dosaženo stejných respektive velmi podobných průběhů regulací, jak při simulacích, což při předpokladu stejných hodnot parametrů soustavy není nijak překvapující. Průběhy regulací jsou zde z důvodu demonstrace vlivu nastavení parametrů regulátoru, při provozních podmínkách nejsou tyto změny tak patrné. Pro start algoritmu byly počáteční hodnoty vektoru parametrů nastaveny na  $\hat{\Theta} = [0,1; 0,2; 0,3; 0,4]$ , nastavení bylo stejné i u 2DOF. U regulátorů 2R1 se nepodařil odstranit počáteční překmit.

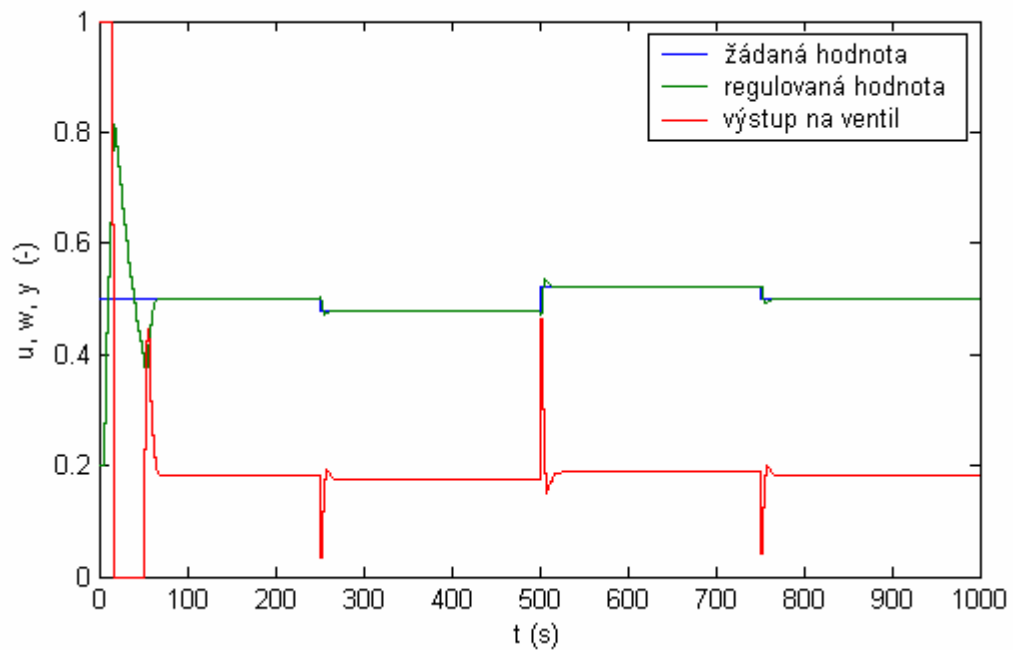
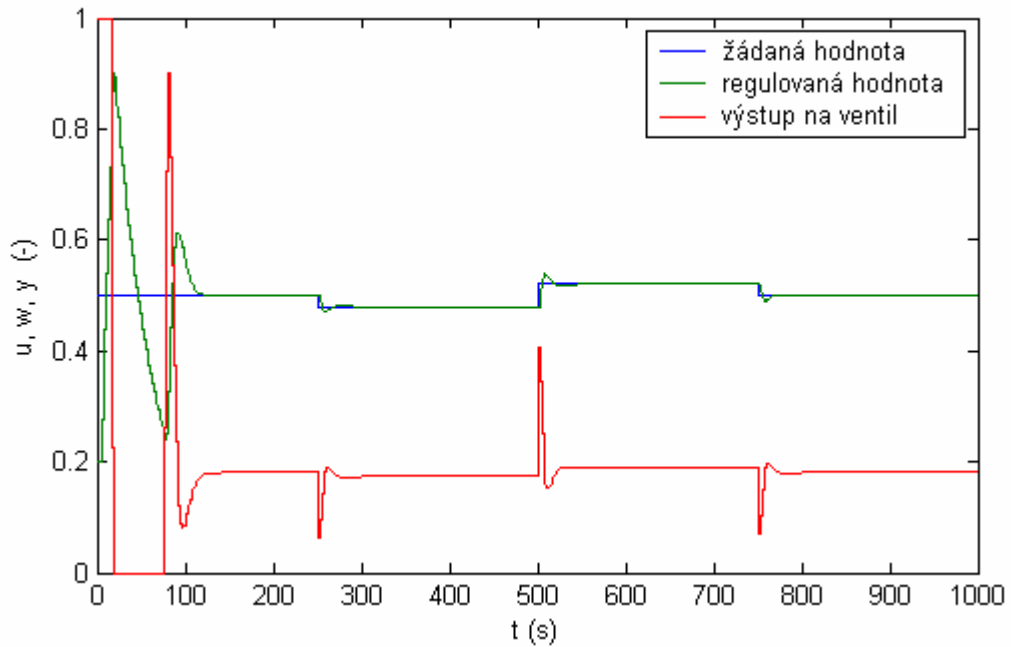


Obr. 38 Průběh regulace:  $\omega = 0,06$ ;  $\zeta = 1$



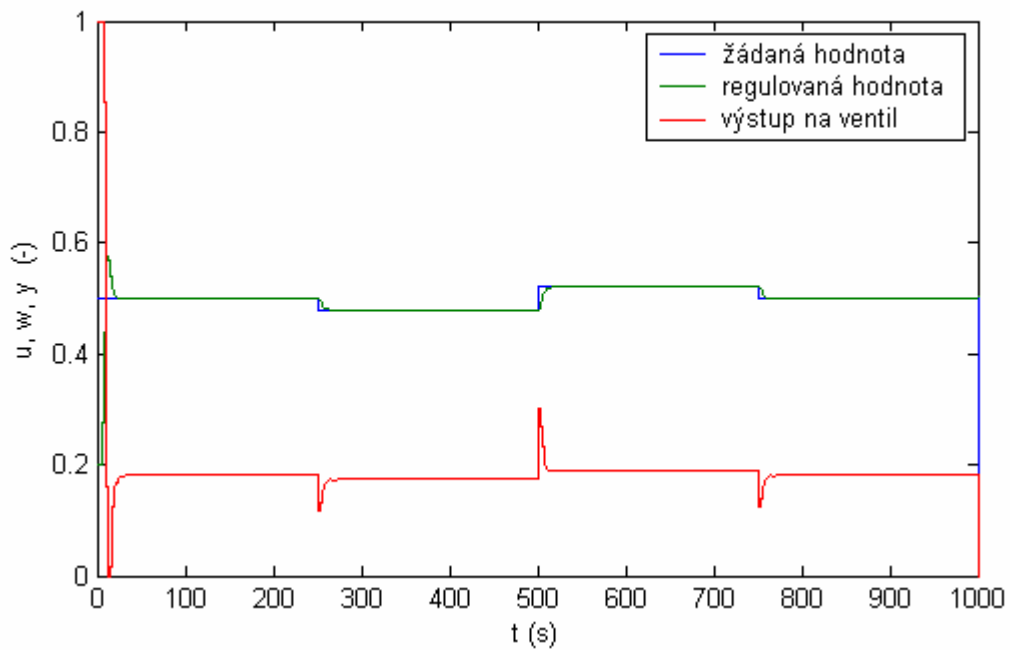
Obr. 39 Průběh regulace:  $\omega = 0,04$ ;  $\zeta = 1$



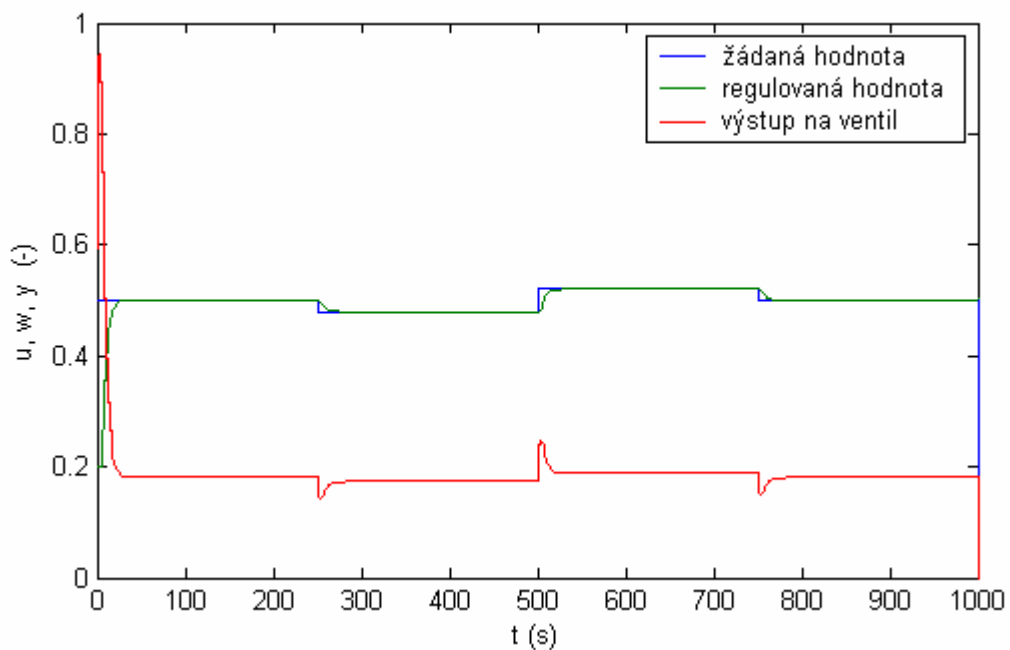
Obr. 40 Průběh regulace:  $\omega = 0,03$ ;  $\xi = 1$ ;  $\alpha = 0.55$ Obr. 41 Průběh regulace:  $\omega = 0,03$ ;  $\xi = 1$ ;  $\alpha = 0.77$

### 3.4.5 Řízení pomocí adaptivních diskrétních regulátorů s 2DOF konfigurací

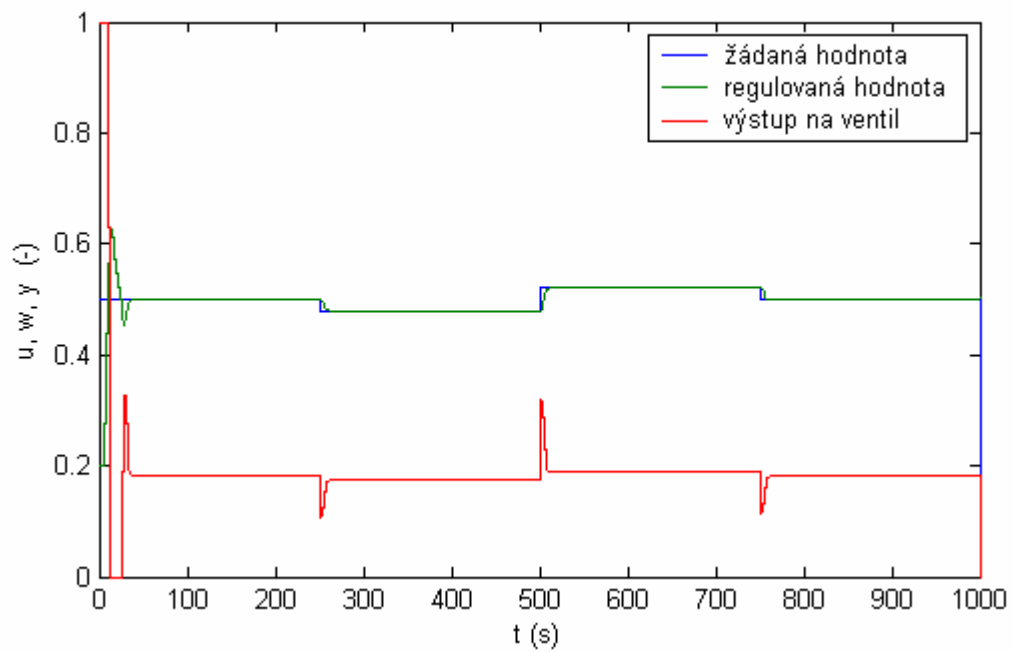
U regulátorů 2R1, 2R2 byly průběhy regulačního pochodu opět téměř shodné s regulátory s pevně nastavenými parametry. Tyto regulátory se velmi dobře nastavují a v našem případě je průběh řízení téměř dokonalý.



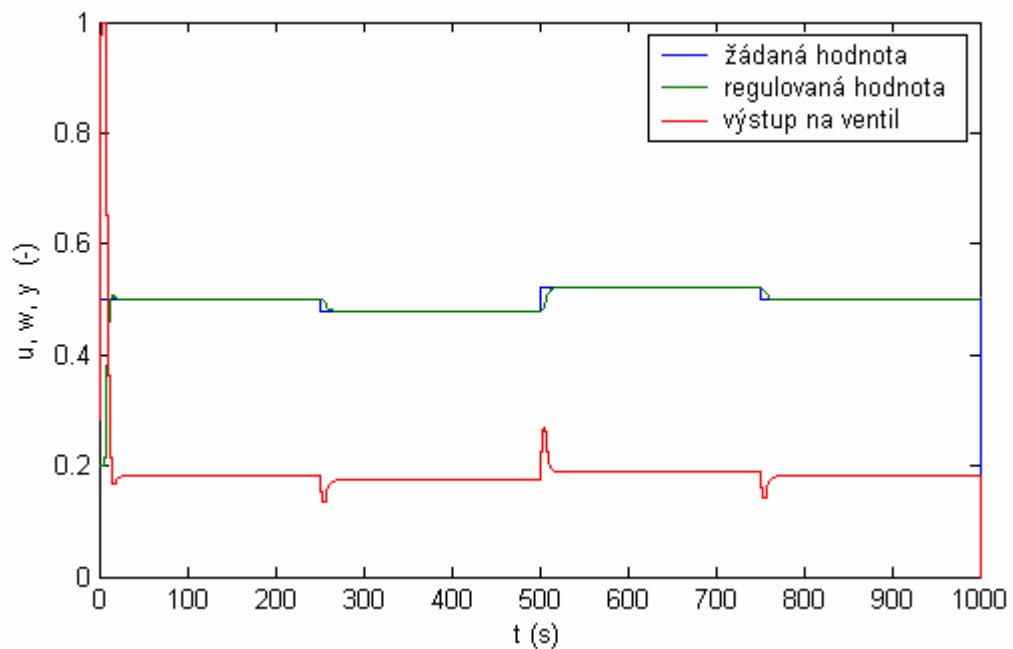
Obr. 42 Průběh regulace:  $\omega = 0,5$ ;  $\zeta = 1$



Obr. 43 Průběh regulace:  $\omega = 0,3$ ;  $\zeta = 1$



Obr. 44 Průběh regulace:  $\omega = 0,1$ ;  $\zeta = 1$ ;  $\alpha = 0,4$

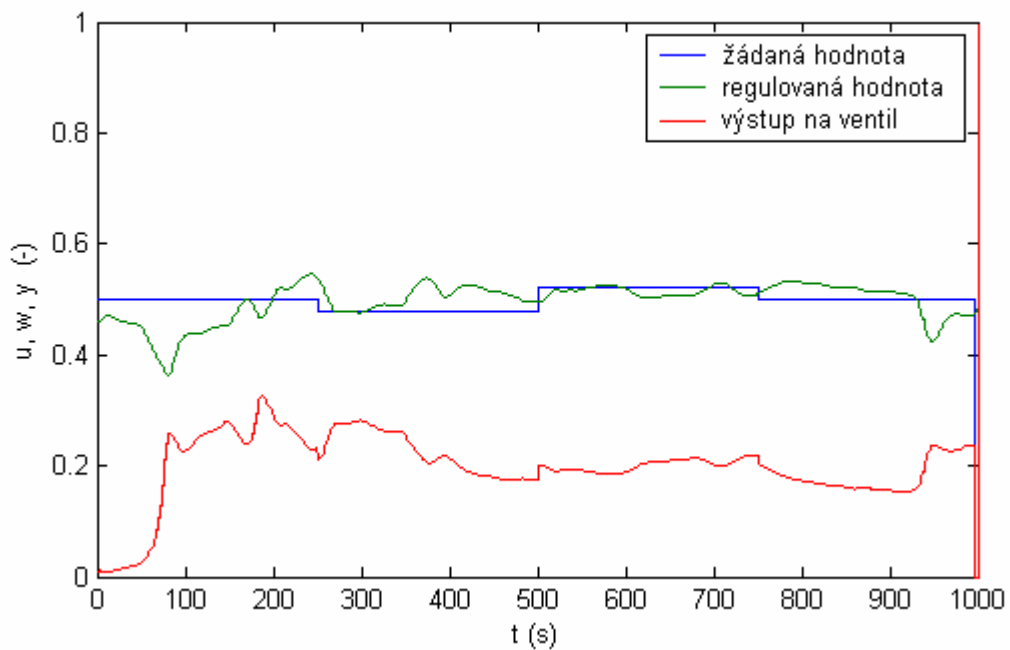


Obr. 45 Průběh regulace:  $\omega = 0,2$ ;  $\zeta = 1$ ;  $\alpha = 0,6$

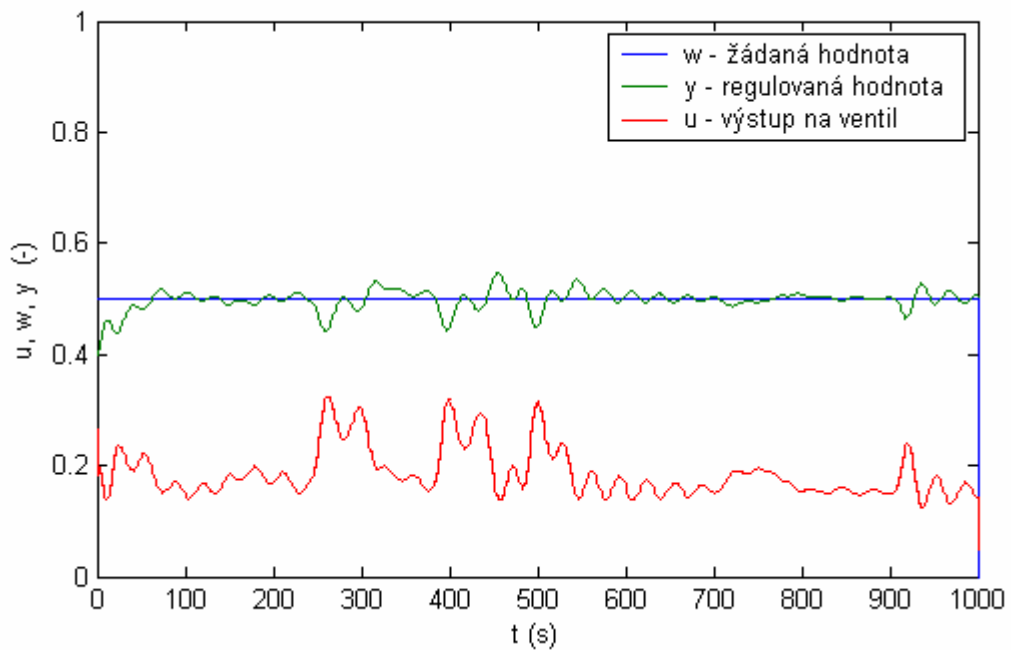
### 3.5 Řízení teploty prováděné na soustavě TUV za provozních podmínek

Níže uvedené měření bylo prováděno v době největších odběrů TUV, což je mezi 18 a 21 hodinou. Žádaná teplota byla nastavena na 50°C, skokové změny byly použity pouze z experimentálních důvodů a v běžném provozu se nevyskytují.

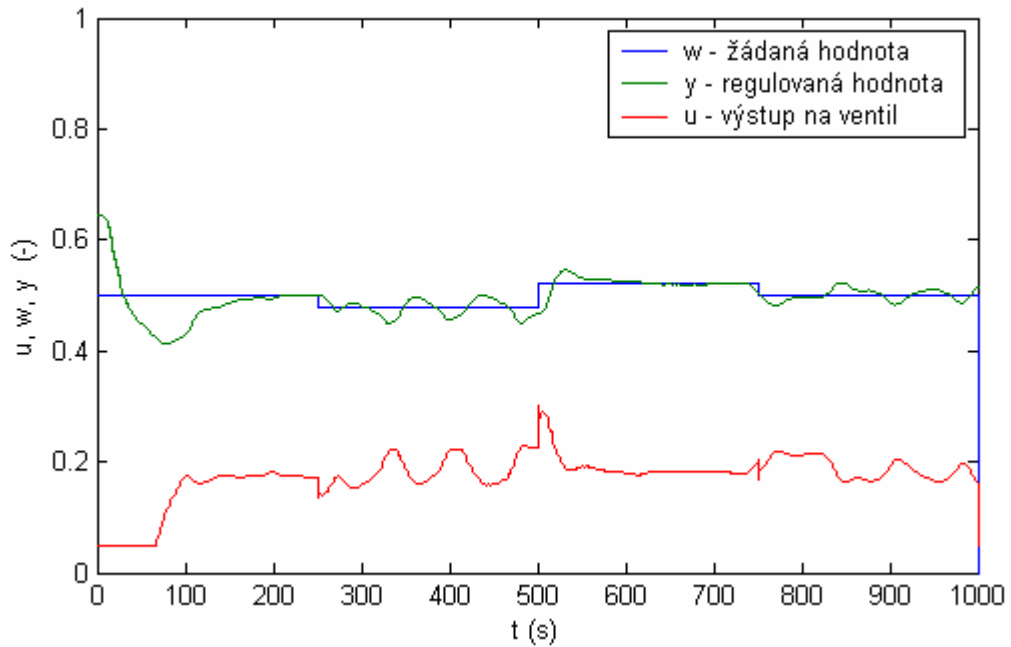
Při provádění experimentů bylo zjištěno, že regulátory s pevně nastavenými parametry jsou schopny reagovat na změny odběrů poměrně rychle a teplotu TUV regulují bez větších regulačních odchylek. Tyto regulátory lépe kompenzovaly regulační odchylku než regulátor PSD, což je z průběhů zřejmé. Pro start algoritmu byly počáteční hodnoty vektoru parametrů nastaveny na  $\hat{\Theta} = [0.1; 0.2; 0.3; 0.4]$ .



Obr. 46 Průběh regulace s PSD regulátorem



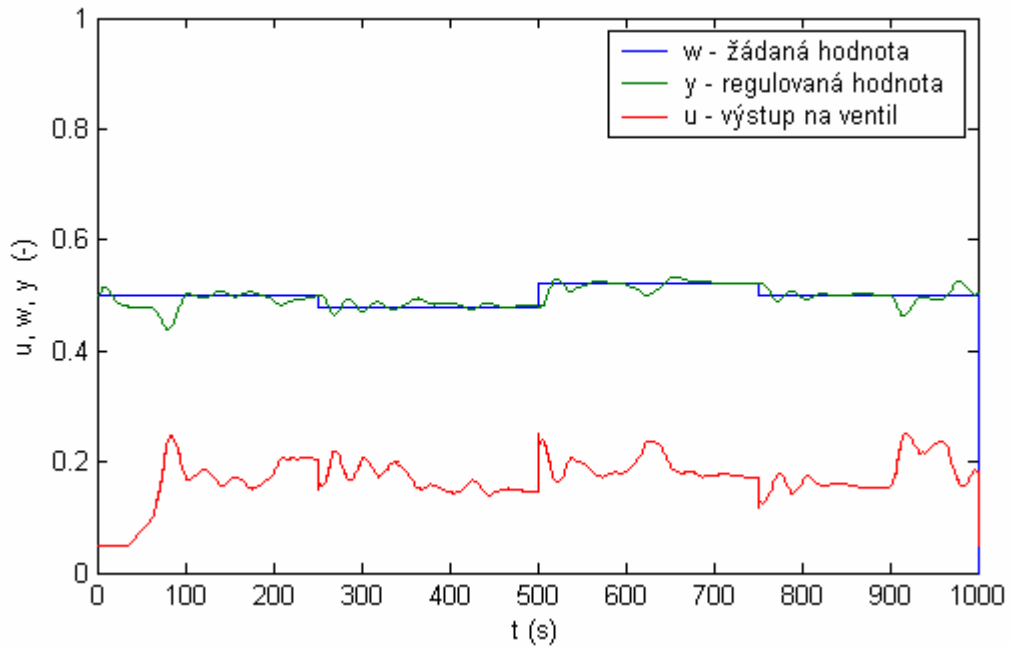
Obr. 47 Průběh regulace s IR1 regulátorem



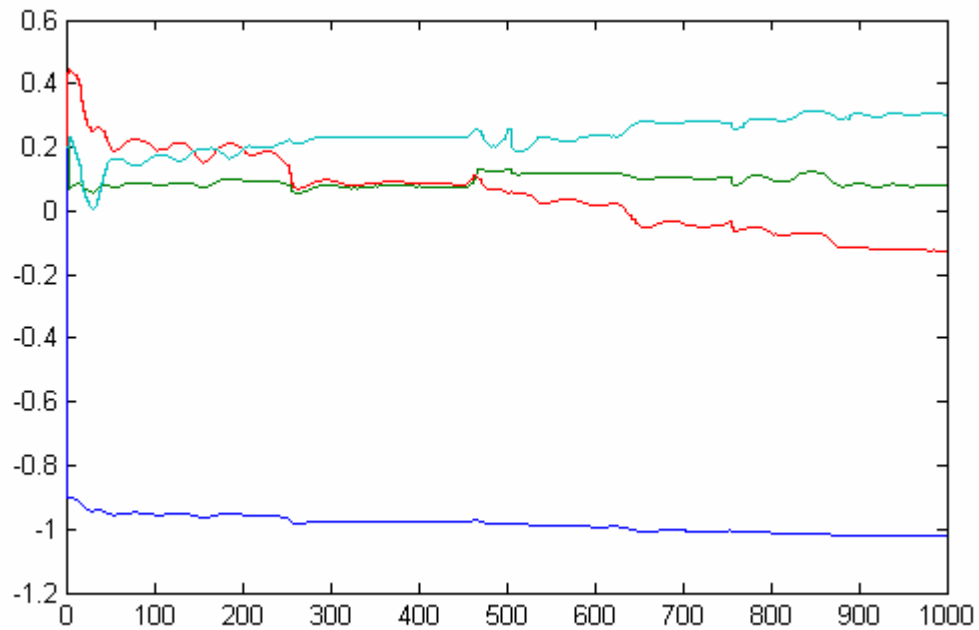
Obr. 48 Průběh regulace s 2R1 regulátorem

**Adaptivní regulátory** vykazovaly lepší výsledky regulace a dokázali si poradit s náhlými a častými změnami odběrů. Velké změny parametrů jsou patrné z obrázků uvedených pod

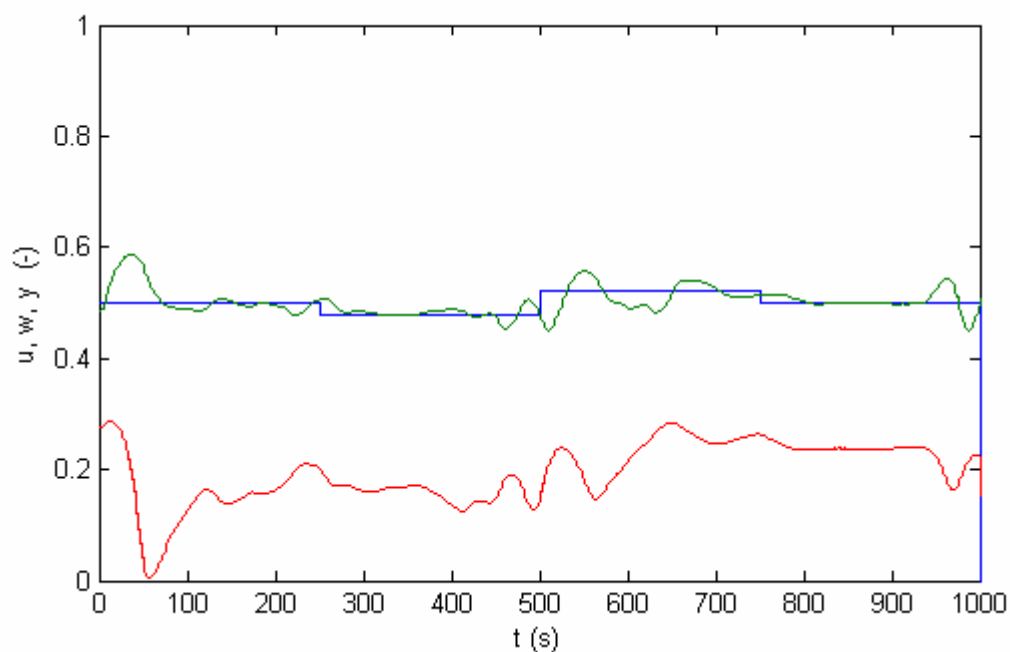
jednotlivými průběhy. Pro start algoritmu byly počáteční hodnoty vektoru parametrů nastaveny na  $\hat{\Theta} = [0.1; 0.2; 0.3; 0.4]$ . Průběhy regulované veličiny se daly upravit pomocí stavitelných parametrů, jejich vliv na průběh regulace je uveden v předchozí části.



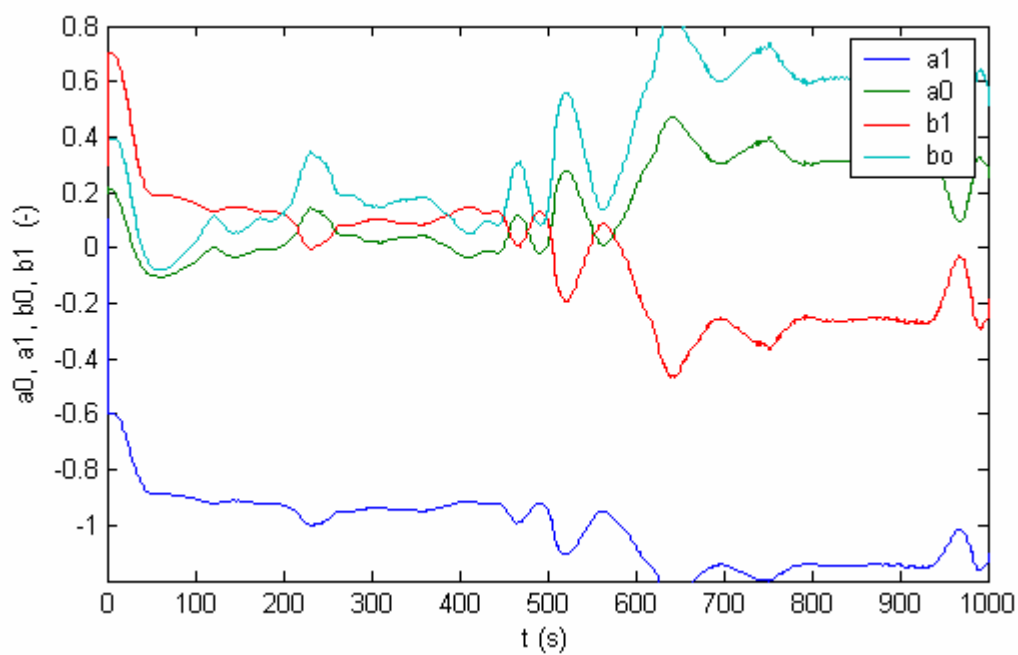
Obr. 49 Průběh regulace s adaptivním 1R1 regulátorem



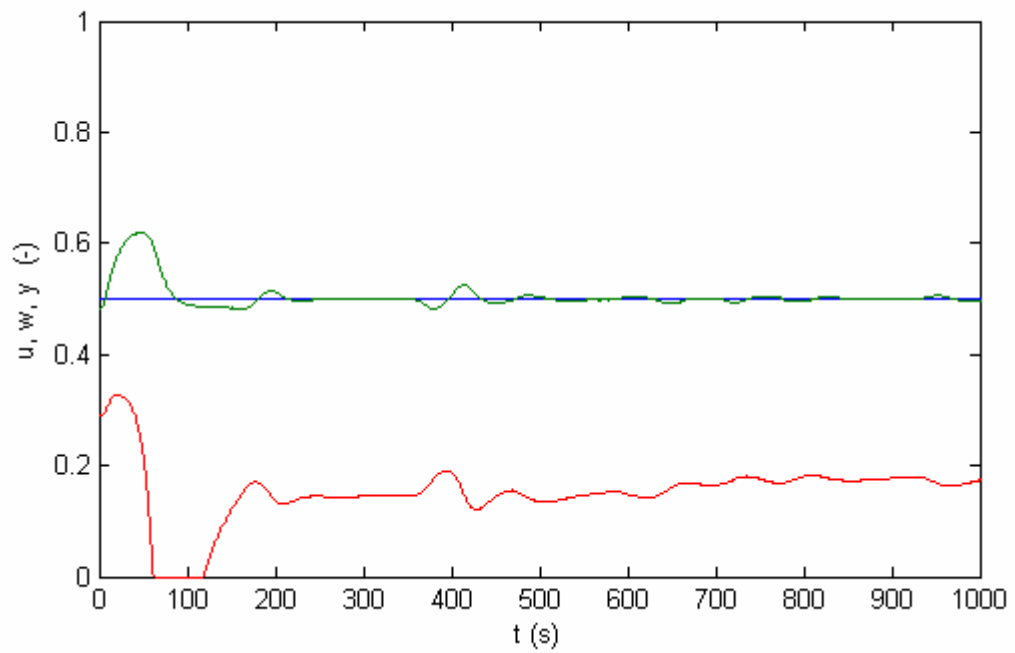
Obr. 50 Průběh parametrů



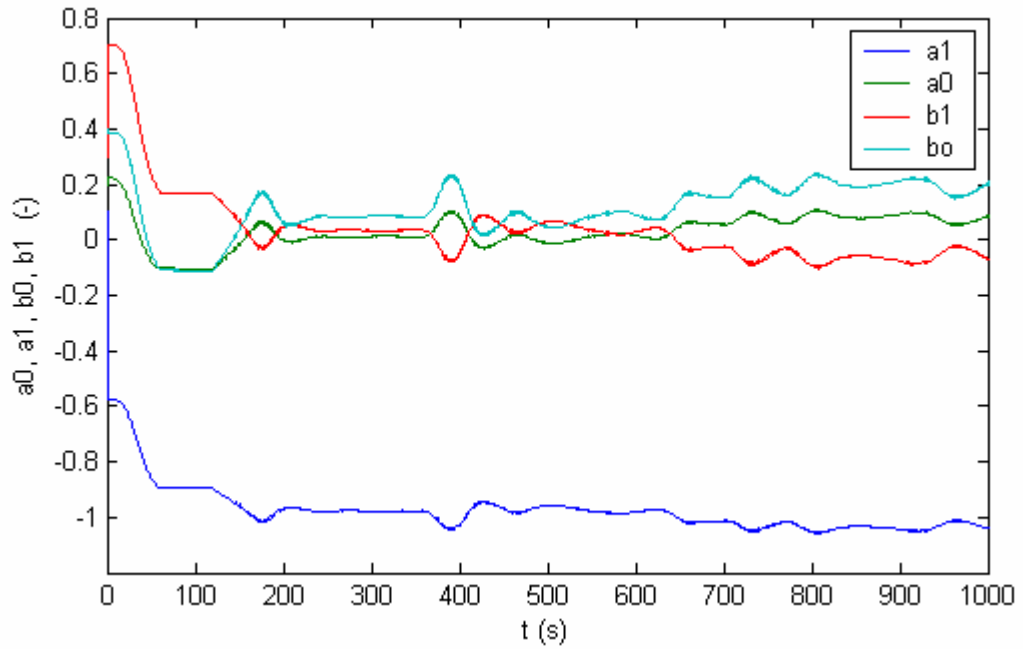
Obr. 51 Průběh regulace s adaptivním IR2 regulátorem



Obr. 52 Průběh parametrů

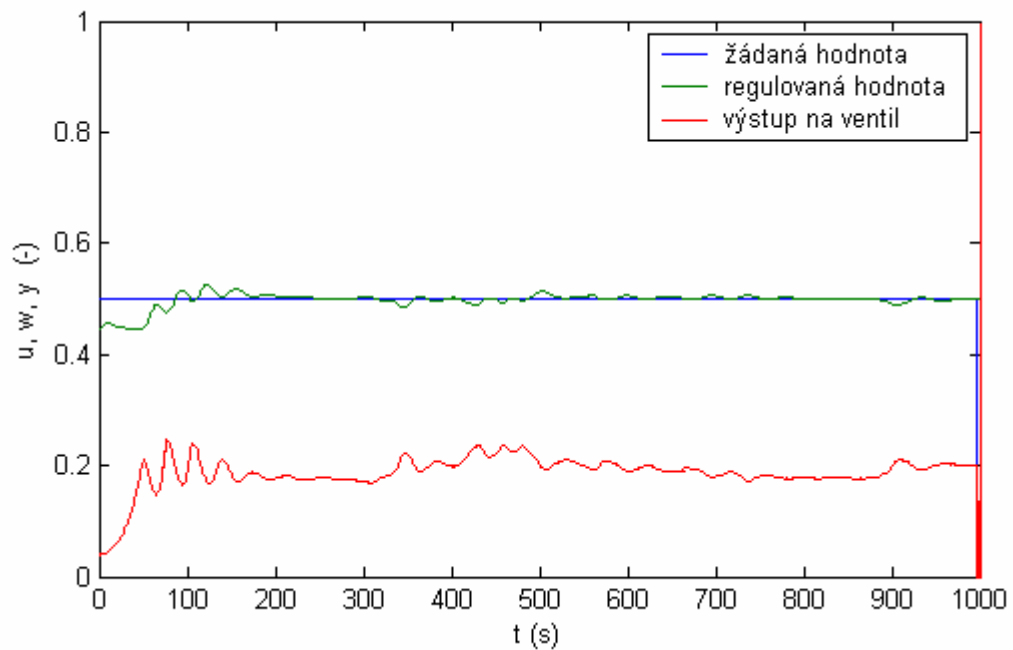


Obr. 53 Průběh regulace s adaptivním 2R1 regulátorem

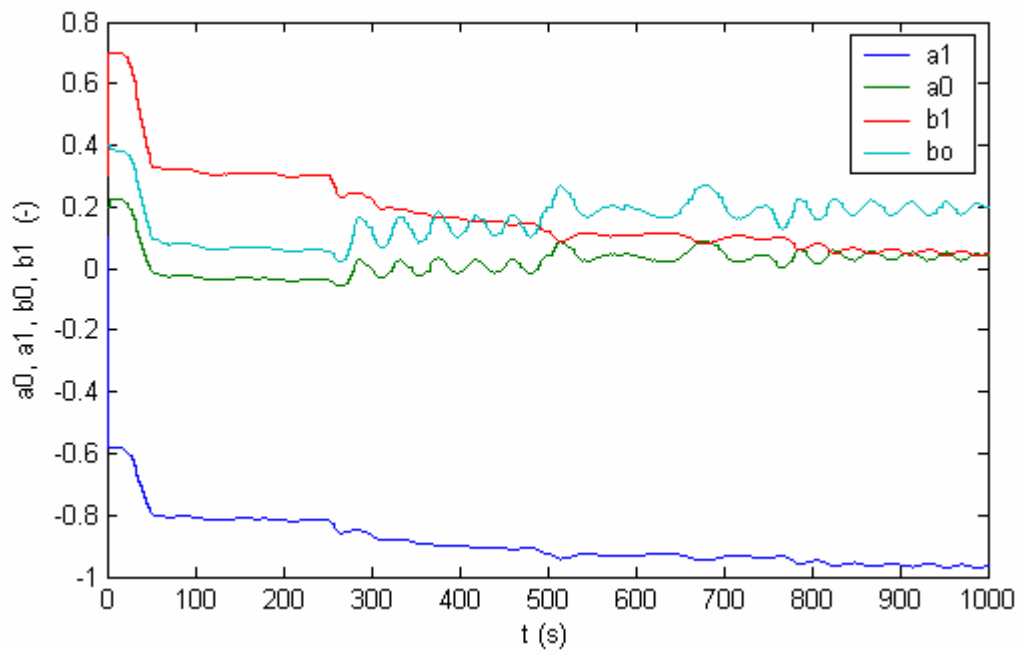


Obr. 54 Průběh parametrů





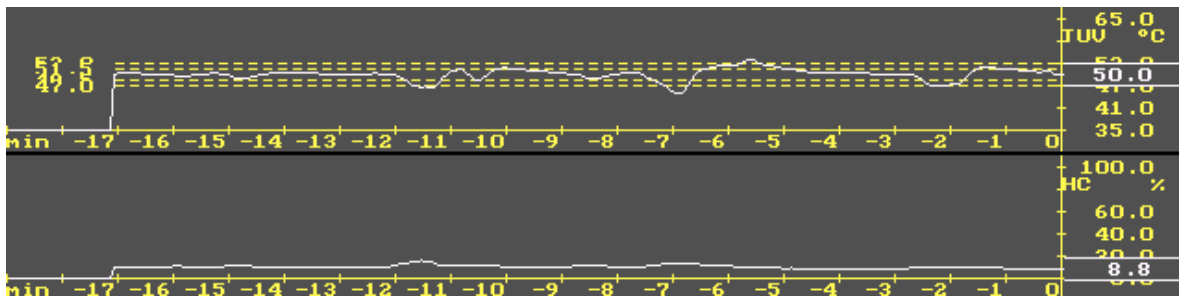
Obr. 55 Průběh regulace s adaptivním 2R2 regulátorem



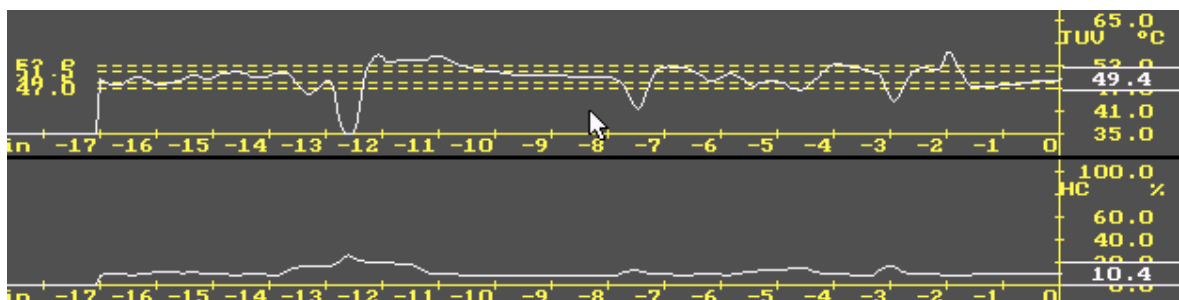
Obr. 56 Průběh parametrů

### 3.5.1 Řízení teploty prováděné na soustavě TUV za provozních podmínek stávajícím regulátorem

Zde jsou pro srovnání uvedeny průběhy řízení stávajícím regulátorem. Průběh na obrázku (Obr. 57) je pořízen v době menších odběrů, a je vidět, že řídicí systém si při tomto stavu s odběry poměrně slušně poradí. V době velkých odběrů (Obr. 58) však tento průběh už moc uspokojivý není a porovnáním dosažených výsledků řízení prováděných za srovnatelných podmínek je patrné, že pomocí navrženého řešení bylo dosaženo lepších výsledků.



Obr. 57 Průběh regulace ze stávajícím regulátorem



Obr. 58 Průběh regulace ze stávajícím regulátorem

## ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo navrhnout vhodné regulátory pro řízení ohřevu teplé užitkové vody, který je součástí výměňkové stanice. Současný PSD algoritmus s pevně nastavenými regulačními konstantami, který je součástí řídicího systému Tronic 2008E, zvládá spolehlivě regulovat ohřev TUV v době kvaziustáleného stavu, tedy mimo denní odběrové špičky. Významný problém nastává v době denních odběrových špiček, kdy regulační systém nedokáže pružně reagovat na dynamiku změn v soustavě.

Navržené řešení se opírá o polynomiální metody moderní teorie řízení, které dosud v praktických aplikacích nejsou příliš rozšířeny. Ačkoliv přinášejí vyšší nároky na znalosti teorie řízení, jejich použití zpravidla vede k dosažení lepších výsledku regulačních pochodů. Konkrétní závěry, které vplynuly z řešení je možno shrnout do několika bodů:

- Navržené regulační algoritmy s pevně nastavenými parametry přinesly významné zlepšení v regulaci ohřevu TUV v porovnání s PSD algoritmy, které tvoří základ současného řídicího systému Tronic 2008E.
- Pro zvýšení odběratelského komfortu se v době denních špiček odběrů TUV ukázalo nezbytné použití adaptivních regulátorů, jelikož za tohoto stavu se výrazně mění parametry soustavy. V navrženém řešení byla pro identifikaci parametrů soustavy využita metoda nejmenších čtverců s adaptivním směrovým zapomínáním.
- Nejlepší kvality regulace bylo dosaženo adaptivním regulátorem 2R1.

Úspěšně navržené a ověřené adaptivní algoritmy by v případě implementace do řídicího systému Tronic 2008E měly přinést významné vylepšení kvality regulace ohřevu TUV a tím i zvýšení aplikačního potenciálu tohoto komerčně dostupného systému.

## CONCLUSION

The goal of this thesis was to design appropriate regulators to control the heating system of hot supply water which is a part of junction exchange station. The current PSD algorithm with fixed regulatory constants which is a part of the Tronic 2008E system is able to control the heating of hot supply water only during the quasi constant status i.e. during the off-peak period of the day. However during the peak period, there is a major problem of the regulatory system being unable to flexibly react to the dynamics of the changes in the system.

The proposed solution is based on the polynomial methods of modern theories of regulation which are still not so commonly used in practical applications. Although those methods pose higher requirements on the knowledge of the theories of regulation, their usage usually brings better results in regulatory processes. Specific conclusions resulting from the proposed solution can be summarized to the following points.

- The proposed regulatory algorithms with fixed parameters brought a substantial improvement in the control of heating of hot supply water in comparison with the PSD algorithms which are a part of the Tronic 2008E system.
- In order to enhance the consumer's comfort during the peak periods of hot water supply, the use of adaptive regulators has proven to be necessary due to the fact that during those conditions the parameters of the systems vary too much. The proposed solution utilizes the method of least squares with adaptive directional forgetting to identify the parameters.
- The best quality of regulation was achieved by using the 2R1 regulator.

If implemented into the Tronic 2008E regulatory system, the proposed and successfully verified adaptive regulators would bring a substantial improvement to the quality of controlling of the heating of hot supply water and subsequently, they would significantly enhance the possibilities for application of this commercially available regulator.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] NOSKIEVIČ, P.: Modelování a identifikace systémů. MONTANEX, 1999.
- [2] BALÁTĚ, J.: Automatické řízení. BEN, Praha 2003.
- [3] BOBÁL, V., BOHM, J., PROKOP, R., FESSL, J.: Praktické aspekty samočinně se nastavujících regulátorů: algoritmy a implementace. VUTIUM, 1999.
- [4] KARBAN, P.: Výpočty a simulace v programech Matlab a Simulink. Computer Press, 2006
- [5] ŠVARC, I.: AUTOMATIZACE - Automatické řízení. CERM 2005
- [6] <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/simulink/index.html?access/helpdesk/help/toolbox/simulink/sfg/f8-93765.html>
- [7] <http://www.sensit.cz/sortiment/snimace-teploty/s-rychlou-odezvou>
- [8] <http://www.wilo.cz/cps/rde/xchg/cz-cs/layout.xsl/1002.htm>
- [9] [http://www.siemens.cz/siemjetstorage/files/38061\\_N4455C\\$MXG\\$F\\$461\\$.pdf](http://www.siemens.cz/siemjetstorage/files/38061_N4455C$MXG$F$461$.pdf)
- [10] <http://www.bcb-plzen.eu/alfalaval/pajene.htm>
- [11] <http://www.tronic.cz/zmt2008e.aspx>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$A(z^{-1})$	Polynom jmenovatele Z-přenosu soustavy
$a_1..a_8$	Koeficienty jmenovatele Z-přenosu soustavy
$B(z^{-1})$	Polynom čitatele Z-přenosu soustavy
$b_1..b_8$	Koeficienty čitatele Z-přenosu soustavy
$D(z^{-1})$	Charakteristický polynom
$d_1,..d_4$	Koeficienty charakteristického polynomu
$E(z^{-1})$	Obraz odchylky
$G_R(z^{-1})$	Přenos regulátoru
$G_S(z^{-1})$	Přenos soustavy
$G_W(z^{-1})$	Přenos řízení
$P(z^{-1})$	Polynom jmenovatele regulátoru
$p_0...p_2$	Koeficienty jmenovatele regulátoru
$Q(z^{-1})$	Polynom čitatele zpětnovazební části regulátoru
$q_0...q_2$	Koeficienty čitatele zpětnovazební části regulátoru
$R(z^{-1})$	Polynom čitatele přímovazební části regulátoru
<b>1DOF</b>	Regulační obvod s jedním stupněm volnosti
<b>2DOF</b>	Regulační obvod s dvěma stupni volnosti
$k$	Krok výpočtu
$T_v$	Perioda vzorkování
$C$	Čtvercová kovarianční matice
$T$	Perioda vstupního signálu
$\varphi$	Faktor směrového zapomínání
$\phi$	Vektor dat
$\Theta$	Vektor odhadů parametrů

---

<i>w</i>	Žádaná veličina
<i>e</i>	Regulační odchylka
<i>u</i>	Akční veličina vstupující do soustavy
<i>y</i>	Výstupní regulovaná veličina
<i><math>\omega</math></i>	Vlastní kruhová frekvence
<i><math>\xi</math></i>	Poměrný koeficient tlumení
<i><math>\alpha</math></i>	Nastavitelný parametr regulátorů
<i>TUV</i>	Teplá užitková voda
<i>PSD</i>	Diskrétní PID regulátor

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1</i> Deskový výměník .....	11
<i>Obr. 2</i> Detail tvaru kanálků .....	12
<i>Obr. 3</i> Nepřímý jednoduchý výměník.....	13
<i>Obr. 4</i> Průběhy teplot v simulačním modelu výměníku .....	14
<i>Obr. 5</i> Řez magnetickým ventilem.....	15
<i>Obr. 6</i> Ovládací prvky a indikátory na elektronické desce.....	16
<i>Obr. 7</i> Základní charakteristiky ventilu .....	16
<i>Obr. 8</i> Snímač teploty .....	17
<i>Obr. 9</i> Detail svorkovnice a příklady zapojení .....	18
<i>Obr. 10</i> Oběhové čerpadlo.....	19
<i>Obr. 11</i> Charakteristika čerpadla.....	19
<i>Obr. 12</i> Regulátor T2008E .....	20
<i>Obr. 13</i> Detail svorek regulátoru .....	21
<i>Obr. 14</i> Blokové schéma regulačního obvodu s regulátorem PID .....	23
<i>Obr. 15</i> Blokové schéma s 2DOF regulátorem.....	26
<i>Obr. 16</i> Statická charakteristika .....	33
<i>Obr. 17</i> Přejchodová charakteristika.....	34
<i>Obr. 18</i> Schéma identifikačního obvodu.....	35
<i>Obr. 19</i> Odezva systému na náhodný signál .....	35
<i>Obr. 20</i> Schéma simulačního regulačního obvodu .....	36
<i>Obr. 21</i> Schéma regulačního obvodu pro řízení soustavy TUV.....	36
<i>Obr. 22</i> Vnitřní zapojení bloku Adaptivního regulátoru IRI .....	37
<i>Obr. 23</i> Vnitřní zapojení bloku TUV.....	37
<i>Obr. 24</i> Nastavitelné parametry regulátoru .....	38
<i>Obr. 25</i> Simulace regulace s 1DOF regulátorem.....	40
<i>Obr. 26</i> Simulace regulace s adaptivním 1DOF regulátorem.....	40
<i>Obr. 27</i> Simulace regulace s 2DOF regulátorem.....	41
<i>Obr. 28</i> Simulace regulace s adaptivním 2DOF regulátorem.....	41
<i>Obr. 29</i> Průběh regulace s PSD regulátorem.....	42
<i>Obr. 30</i> Průběh regulace: $\omega = 0,03$ ; $\zeta = 2$ .....	43



<i>Obr. 31 Průběh regulace: <math>\omega = 0,05</math>; <math>\zeta = 1</math>; <math>\alpha = 0.55</math>.....</i>	43
<i>Obr. 32 Průběh regulace : <math>\omega = 0,05</math>; <math>\zeta = 1</math>; <math>\alpha = 0.75</math>.....</i>	44
<i>Obr. 33 Průběh regulace: <math>\omega = 0,4</math>; <math>\zeta = 1</math>.....</i>	45
<i>Obr. 34 Průběh regulace: <math>\omega = 0,5</math>; <math>\zeta = 1</math>.....</i>	45
<i>Obr. 35 Průběh regulace: <math>\omega = 0,4</math>; <math>\zeta = 1,5</math>.....</i>	46
<i>Obr. 36 Průběh regulace: <math>\omega = 0,3</math>; <math>\zeta = 1</math>; <math>\alpha = 0.4</math>.....</i>	46
<i>Obr. 37 Průběh regulace: <math>\omega = 0,1</math>; <math>\zeta = 1</math>; <math>\alpha = 0.6</math>.....</i>	47
<i>Obr. 38 Průběh regulace: <math>\omega = 0,06</math>; <math>\zeta = 1</math>.....</i>	48
<i>Obr. 39 Průběh regulace: <math>\omega = 0,04</math>; <math>\zeta = 1</math>.....</i>	48
<i>Obr. 40 Průběh regulace: <math>\omega = 0,03</math>; <math>\xi = 1</math>; <math>\alpha = 0.55</math>.....</i>	49
<i>Obr. 41 Průběh regulace: <math>\omega = 0,03</math>; <math>\xi = 1</math>; <math>\alpha = 0.77</math>.....</i>	49
<i>Obr. 42 Průběh regulace: <math>\omega = 0,5</math>; <math>\zeta = 1</math>.....</i>	50
<i>Obr. 43 Průběh regulace: <math>\omega = 0,3</math>; <math>\zeta = 1</math>.....</i>	50
<i>Obr. 44 Průběh regulace: <math>\omega = 0,1</math>; <math>\zeta = 1</math>; <math>\alpha = 0.4</math>.....</i>	51
<i>Obr. 45 Průběh regulace: <math>\omega = 0,2</math>; <math>\zeta = 1</math>; <math>\alpha = 0.6</math>.....</i>	51
<i>Obr. 46 Průběh regulace s PSD regulátorem.....</i>	52
<i>Obr. 47 Průběh regulace s 1R1 regulátorem.....</i>	53
<i>Obr. 48 Průběh regulace s 2R1 regulátorem.....</i>	53
<i>Obr. 49 Průběh regulace s adaptivním 1R1 regulátorem.....</i>	54
<i>Obr. 50 Průběh parametrů .....</i>	54
<i>Obr. 51 Průběh regulace s adaptivním 1R2 regulátorem.....</i>	55
<i>Obr. 52 Průběh parametrů .....</i>	55
<i>Obr. 53 Průběh regulace s adaptivním 2R1 regulátorem.....</i>	56
<i>Obr. 54 Průběh parametrů .....</i>	56
<i>Obr. 55 Průběh regulace s adaptivním 2R2 regulátorem.....</i>	57
<i>Obr. 56 Průběh parametrů .....</i>	57
<i>Obr. 57 Průběh regulace ze stávajícím regulátorem.....</i>	58
<i>Obr. 58 Průběh regulace ze stávajícím regulátorem.....</i>	58

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1 Technické parametry snímačů</i> .....	17
<i>Tab. 2 Technické parametry převodníků</i> .....	18
<i>Tab. 3 Popis stavitelných parametrů</i> .....	39