

# Návrh regulace topného hnízda

Temperature control of heating mantle

Bc. Martin Beneš

---

Diplomová práce  
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Beneš**  
Osobní číslo: **A11417**  
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**  
Studijní obor: **Automatické řízení a informatika**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Regulace teploty topného hnízda**

Zásady pro vypracování:

1. Uvedte principy používané při modelování technologických procesů a základní typy modelů. Uvedte metody návrhu regulátoru, které jsou vhodné pro systémy s neurčitými nebo časově proměnnými parametry.
2. Vytvořte rešerši zabývající se senzory, akčními členy a řídicími prvky vhodnými pro použití v chemické laboratoři.
3. Popište laboratorní soustavu topného hnízda a vytvořte její zjednodušený matematicko-fyzikální model. Model převedte do prostředí Matlab/Simulink.
4. Navrhněte regulátor pro regulaci teploty topného hnízda a ověřte jej na simulinkovém modelu pro různé parametry modelu.
5. Navrhněte a sestavte hardware, který bude sloužit k regulaci topného hnízda.
6. Naprogramujte a v reálných podmínkách ověřte navržený regulační systém.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. **BOBÁL, Vladimír. Adaptivní a prediktivní řízení. 1. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2008, 134 s. ISBN 978-80-7318-662-3.**
2. **BOBÁL, Vladimír. Identifikace systémů. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2009, 128 s. ISBN 978-80-7318-888-7.**
3. **CORRIOU, Jean-Pierre. Process control: theory and applications. London: Springer, c2004, xx, 752 s. ISBN 1-85233-776-1.**
4. **DOSTÁL, Petr a Radek MATUŠŮ. Stavová a algebraická teorie řízení. Vyd. 1. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 90 s. ISBN 978-80-7318-991-4.**
5. **HRUŠKA, František. Senzory: fyzikální principy, úpravy signálů, praktické použití (e-book). 2. rozš. vyd. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011, [2021] s. ISBN 978-80-7454-096-7.**
6. **KOLOMAZNÍK, Karel. Modelování zpracovatelských procesů. 1. vyd. Brno: VUT, 1990, 191 s. ISBN 8021401141.**
7. **MATUŠŮ, Radek. Systems with parametric uncertainty: an algebraic approach to robust control design. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, c2010, 183 s. ISBN 978-3-8383-0645-2.**
8. **MÍKA, Vladimír. Základy chemického inženýrství. 2. nezm. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981, 870 s.**

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Petr Chalupa, Ph.D.**

Ústav řízení procesů

Datum zadání diplomové práce:

**24. února 2013**

Termín odevzdání diplomové práce:

**11. června 2013**

Ve Zlíně dne 24. února 2013

  
prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
*děkan*



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

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce je zaměřena na problematiku řízení teploty topných hnízd, které se používají v chemické laboratoři pro experimentální účely. V teoretické části se věnuji základním pojmům spojeným s teorií řízení, s metodami identifikace systémů, návrhem regulátorů s časově proměnnými nebo neurčitými parametry a akčním členům a senzorů, které jsou vhodné pro použití v chemické laboratoři. Praktická část je zaměřena na identifikaci topného hnízda. Dále popisuji použitý hardware a software vzniklého výrobku určeného pro řízení teploty topných zařízení. Vyrobené zařízení je vybaveno dvěma adaptivními regulátory a jedním klasickým diskrétním regulátorem.

Klíčová slova: regulace, identifikace, matematický model, adaptivní regulátor, mikropočítač, teplota, topné hnízdo.

## **ABSTRACT**

This master thesis is focused on temperature control of heating mantle, which are used in chemical laboratories for experimental purposes. In the theoretical part, I pursue basic concepts related to control theories, methods of system identification and controller design for systems with time varying or uncertain parameters and actuators and sensors, which are suitable for use in a chemical laboratory. The practical part is focused on the identification of heating mantle. Furthermore, I describe the hardware and software of resulting product intended for temperature control of heating systems. Made device is equipped with two adaptive controllers and one classical discrete controller.

Keywords: control, identification, mathematical model, adaptive controller, microcomputer temperature, heating mantle.

Především bych chtěl poděkovat panu Ing. Petru Dostálkovi, Ph.D. za technickou podporu spojenou s výrobou finálního výrobku a vedoucímu této práce panu Ing. Petru Chalupovi, Ph.D. za jeho věcné rady a za jeho pomoc při vytváření této práce. Dále bych rád poděkovat panu Ing. Jiřímu Pechovi a jeho kolegům z chemické laboratoře, kteří mi umožnili naměřit potřebná data. Nemohu opomenout poděkování patřící panu Ing. Stanislavu Plškovi za jeho věcné poznámky týkající se návrhu hardwaru. Samozřejmě také děkuji svým rodičům, kteří celé moje studium umožnili. Nakonec bych chtěl poděkovat své přítelkyni za její skvělou psychickou podporu.

### **Prohlašuji, že**

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

### **Prohlašuji,**

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

Ve Zlíně

.....  
podpis diplomanta

# OBSAH

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ÚVOD</b> .....   | <b>10</b> |
| <b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....  | <b>11</b> |
| <b>1 ZÁKLADNÍ POJMY</b> .....   | <b>12</b> |
| <b>2 IDENTIFIKACE</b> .....   | <b>16</b> |
| 2.1 ZÁKLADNÍ PŘÍSTUPY K IDENTIFIKACI .....  | 16        |
| 2.1.1 Analytický přístup .....  | 16        |
| 2.1.2 Experimentální přístup .....  | 16        |
| 2.1.3 Identifikace v praxi .....  | 17        |
| 2.2 MATEMATICKÝ MODEL A MODELOVÁNÍ .....  | 17        |
| 2.2.1 Klasifikace modelů.....   | 18        |
| 2.2.2 Postup modelování dynamických systémů .....                                 | 20        |
| 2.3 VNITŘNÍ POPIS DYNAMICKÉHO SYSTÉMU.....  | 22        |
| 2.3.1 Stavový popis nelineárního spojitého dynamického systému.....               | 22        |
| 2.3.2 Stavový popis lineárního spojitého dynamického systému .....                | 22        |
| 2.3.3 Linearizace modelu .....  | 23        |
| 2.4 EXPERIMENTÁLNÍ METODY IDENTIFIKACE.....                                       | 25        |
| 2.4.1 Metoda nejmenších čtverců.....  | 25        |
| 2.4.1.1 ARX model .....   | 25        |
| 2.4.2 Princip metody nejmenších čtverců .....                                     | 26        |
| 2.4.3 Průběžná metoda nejmenších čtverců .....                                    | 27        |
| <b>3 REGULÁTORY</b> .....   | <b>29</b> |
| 3.1 ŘÍDICÍ SYSTÉMY SPOJITÉ A DISKRÉTNÍ.....                                       | 29        |
| 3.2 REGULÁTORY PRO SYSTÉMY S NEURČITÝMI NEBO ČASOVĚ PROMĚNNÝMI<br>PARAMETRY ..... | 31        |
| 3.2.1 Robustnost řízení.....  | 31        |
| 3.2.2 Adaptivní řízení.....   | 32        |
| 3.2.2.1 Adaptivní regulátory založené na heuristickém přístupu .....              | 33        |
| 3.2.2.2 Adaptivní regulátory s referenčním modelem .....                          | 33        |
| 3.2.2.3 Samočinně se nastavující regulátory.....                                  | 34        |
| <b>4 SENZORY A AKČNÍ ČLENY</b> .....  | <b>36</b> |
| 4.1 PLATINOVÉ SENZORY TEPLoty .....   | 36        |
| 4.1.1 Obecné specifikace odporových senzorů .....                                 | 36        |
| 4.1.2 Platinový senzor .....  | 36        |
| 4.1.2.1 Typy platinových senzorů vhodné pro použití v chemické laboratoři.....    | 37        |
| 4.2 RELÉ A STYKAČE .....  | 37        |
| 4.2.1 Elektromagnetické relé.....   | 37        |
| 4.2.2 Polovodičové relé (SSR).....  | 38        |
| 4.2.3 Stykače .....   | 38        |
| <b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....  | <b>40</b> |
| <b>5 TOPNÉHO HNÍDO</b> .....  | <b>41</b> |
| 5.1 POPIS TOPNÉHO HNÍZDA .....  | 41        |
| 5.2 MATEMATICKÝ POPIS TOPNÉHO HNÍZDA .....  | 41        |
| 5.2.1 Nákres problému .....   | 41        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 5.2.2    | Definice veličin .....                                       | 43        |
| 5.2.3    | Zjednodušující předpoklady .....                             | 43        |
| 5.2.4    | Bilance.....   | 43        |
| 5.2.4.1  | Tepelná bilance hnízda .....                                 | 43        |
| 5.2.4.2  | Tepelná bilance baňky .....                                  | 43        |
| 5.2.5    | Model ustáleného stavu.....                                  | 44        |
| 5.2.6    | Odchylkový model .....                                       | 44        |
| 5.3      | URČENÍ PŘENOSOVÉ FUNKCE.....                                 | 46        |
| 5.3.1    | Stavový popis .....  | 46        |
| 5.3.2    | Přenosová funkce .....                                       | 47        |
| <b>6</b> | <b>EXPERIMENTÁLNÍ IDENTIFIKACE .....</b>                     | <b>49</b> |
| 6.1      | EXPERIMENTÁLNÍ IDENTIFIKACE TOPNÉHO HNÍZDA .....             | 50        |
| 6.1.1    | Identifikace topného hnízda o výkonu 150W .....              | 51        |
| 6.1.1.1  | Voda 280ml.....  | 51        |
| 6.1.1.2  | Propylenglykol 280ml.....                                    | 53        |
| 6.1.2    | Identifikace topného hnízda o výkonu 480W .....              | 54        |
| 6.1.2.1  | Voda 1500ml.....   | 54        |
| 6.1.2.2  | Propylenglykol 1000ml.....                                   | 56        |
| <b>7</b> | <b>POPIS HARDWARU .....</b>                                  | <b>58</b> |
| 7.1      | NAPÁJENÍ .....   | 58        |
| 7.2      | CPU .....  | 59        |
| 7.3      | AD PŘEVODNÍK .....   | 60        |
| 7.4      | PAMĚŤ EEPROM.....  | 62        |
| 7.5      | RS 232 .....   | 63        |
| 7.6      | SSR RELÉ .....   | 63        |
| 7.7      | OSTATNÍ SOUČÁSTKY .....                                      | 63        |
| <b>8</b> | <b>PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ.....</b>                              | <b>65</b> |
| 8.1      | INFORMACE K NASTAVOVÁNÍ REGULÁTORŮ.....                      | 65        |
| 8.2      | NÁVOD K OBSLUZE ZAŘÍZENÍ .....                               | 66        |
| 8.2.1    | Regulace .....   | 67        |
| 8.2.2    | Měření .....   | 68        |
| 8.2.3    | Nastavení.....   | 68        |
| 8.2.3.1  | Nastavení periody .....                                      | 68        |
| 8.2.3.2  | Nastavení žádané hodnoty .....                               | 68        |
| 8.2.3.3  | Nastavení regulátoru .....                                   | 69        |
| 8.2.3.4  | Kalibrace teploměru.....                                     | 69        |
| 8.2.4    | Vyp/Zap RS232.....   | 69        |
| 8.3      | PŘESNOST MĚŘENÍ TEPLoty .....                                | 70        |
| <b>9</b> | <b>NÁVRH A OVĚŘENÍ REGULACE .....</b>                        | <b>71</b> |
| 9.1      | ADAPTIVNÍ VERZE REGULÁTORU METODY KONEČNÉHO POČTU KROKŮ..... | 71        |
| 9.2      | ADAPTIVNÍ VERZE REGULÁTORU METODY PŘÍRAZENÍ PÓLŮ .....       | 74        |
| 9.3      | REGULÁTORU NAVRŽENÝ METODOU INVERZE DYNAMIKY .....           | 80        |
|          | <b>ZÁVĚR .....</b>   | <b>82</b> |
|          | <b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>                        | <b>83</b> |
|          | <b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>               | <b>86</b> |

|                             |           |
|-----------------------------|-----------|
| <b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b> | <b>87</b> |
| <b>SEZNAM TABULEK.....</b>  | <b>89</b> |
| <b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>   | <b>90</b> |

## ÚVOD

V dnešní moderní uspěchané době se klade důraz na zjednodušování a urychlování technologických procesů. S tím je spojen velký rozvoj automatizace a řízení. Manuálně obsluhované stroje jsou nahrazovány moderními regulátory, automaty či počítači, které ve většině případů plně nahrazují lidský element. V některých technologických procesech jsou dokonce nenahraditelné. Důležitou součástí automatizace je i zpětnovazební řízení (regulace). Regulátor je hlavním prvkem regulace, a pokud je správně nastaven, tak může být docíleno požadovaného chování příslušného technologického procesu. Způsobů návrhu regulátoru existuje mnoho. S rozvojem počítačové techniky přišly i regulátory číslicové, které oproti klasickým regulátorům (mechanickým, elektrickým...) poskytují jednoduchou implementaci struktury nebo parametrů regulátoru prostřednictvím příslušného řídicího algoritmu. Díky číslicové technice mohou být také aplikovány složitější struktury algoritmů, jako jsou například adaptivní a prediktivní regulátory, které se dokáží vhodně přizpůsobit na změnu parametrů daného technologického procesu.

Návrh regulátoru vychází ze znalosti daného technologického procesu. Základní způsoby, jak získat příslušné znalosti, existují dva. První způsob je postaven na základě znalosti fyzikálních parametrů systému a na znalostech dějů, probíhajících uvnitř systému technologického procesu. U většiny případů se jedná se o náročnější způsob, který popisuje daný technologický proces matematickými rovnicemi, a který se neobejde bez zanedbávání některých souvislostí spjaté s daným technologickým procesem. Druhý způsob pracuje s technologickým procesem jako s černou skříňkou. Tedy není známa jeho vnitřní struktura a znalosti o něm se získávají na základě jeho reakce na změnu přivedenou na jeho vstup. Nejčastěji se však používá kombinace těchto způsobů.

V diplomové práci se zaměřím na principy modelování technologických procesů a uvedu zde základní typy modelů. Dále se zmíním o regulátorech, které jsou vhodné pro systémy s časově proměnnými nebo neurčitými parametry. Také budou uvedeny vybrané senzory a akční členy, které jsou určeny pro užívání v chemické laboratoři. V praktické části stručně popíšu charakteristické vlastnosti topného hnízda a uvedu jeho spočtený matematický model. Následně uvedu experimentální identifikaci topného hnízda. Také popíšu vyrobené zařízení, které je určeno pro regulaci topných soustav. Nakonec ověřím jeho funkčnost na reálných modelech.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 ZÁKLADNÍ POJMY

V první kapitole chci seznámit čtenáře se základními pojmy, které se týkají automatizace a řízení. Tyto informace jsou vhodné pro lajky a složí pro správné pochopení dalších částí práce.

*„Objekt (reálný objekt) je určitá část objektivní reality, kterou podrobujeme zkoumání. Celý zbytek objektivní reality pak představuje okolí.“ [7]*

*„Systém je daná množina prvků spolu s jejich chováním a množina vazeb mezi těmito prvky a mezi prvky a okolím.“ [7]*

Základní klasifikace systémů rozděluje systémy na fyzikální (hmotné) a abstraktní. Podstatou fyzikálních systémů jsou vazby mezi jednotlivými prvky systému, které mají určitou fyzikální podstatu. Fyzikálními systémy se v praxi myslí technologická zařízení, která mají definované procesy v nich probíhající a působí nějak na okolí. Abstraktní systémy jsou myšleny nehmotné systémy, jako jsou například rovnice, data v počítači nebo myšlenky.

Objekt se stává reálným systémem, pokud jsou vymezeny vnitřní procesy a veličiny, které jsou pro daný objekt vlastní.

Subsystem je část systému vyčleněna z určitých důvodů. Prvky subsystemu mají mezi sebou užší vztah než s okolními prvky systému.

Prvek systému je jeho nedělitelná a nejmenší část. Pohled na prvek je velice relativní a je závislý na hloubce poznání daného systému.

Chování systému určuje vztahy mezi okolím systému na systém působící a reakcemi systému právě na tato působení.

Struktura systému definuje vztahy, uspořádání a charakter vnitřních prvků a jejich chování k okolí (k okolním systémům, prvkům), tedy struktura určuje chování systému. Stejně chování více systémů nemusí znamenat, že systémy mají stejnou strukturu.

Informace je soubor zpráv, sdělení nebo dat o neznámých skutečnostech. Existuje mnoho různých způsobů předávání informací (verbální komunikace, neverbální komunikace, písmo atd.). Informace nemá hmotný charakter, avšak jeho nositel má mít hmotný charakter.

Signál je hmotným nositelem informace. Může být realizován například fyzikální veličinami (proud, napětí, výška hladiny atd.).

Vztahy mezi reálným systémem a okolím jsou realizovány právě prostřednictvím signálů. Signály, které vstupují do systému se nazývají vstupní veličiny. Vnitřní změny systému zapříčiněné vstupními veličinami, tedy změny fyzikálních či chemických parametrů uvnitř systému jsou nazývány stavovými veličinami. Některé stavové veličiny pak působí na okolí systému právě prostřednictvím nějakého signálu. Takové veličiny jsou známé pod pojmem výstupní veličiny.

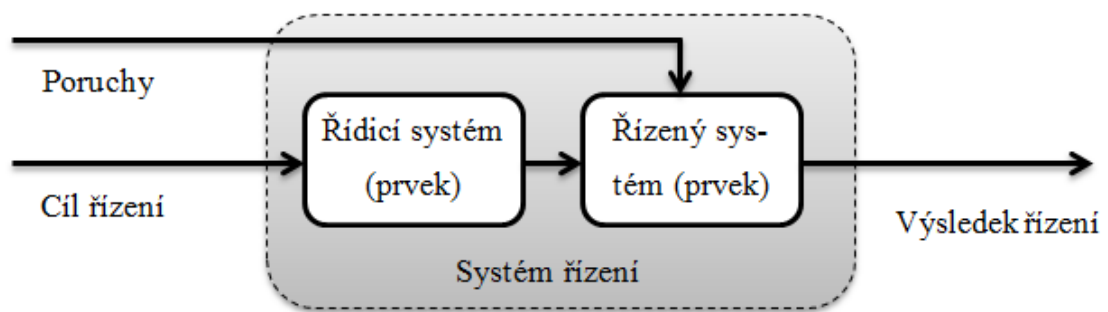
Veškeré zmíněné signály nesou určitou informační hodnotu. Pro správné poznání systému nebo pro optimální návrh řízení je potřeba tyto signály měřit, tedy získávat z nich informační hodnoty. Avšak některé signály měřit nelze (například kvůli neexistenci technologie). Proto se veličiny dělí na měřitelné a neměřitelné. Pak zase některé měřitelné veličiny nejsou měřeny, protože daný signál nenesou žádnou informační hodnotu pro daný problém.

Dalšími důležitými pojmy jsou analýza a syntéza systému. Analýzou se rozumí vyšetřování vlastností a chování daného existujícího systému. Syntéza představuje návrh nového systému nebo jeho úprava tak, aby se získalo požadovaného chování.

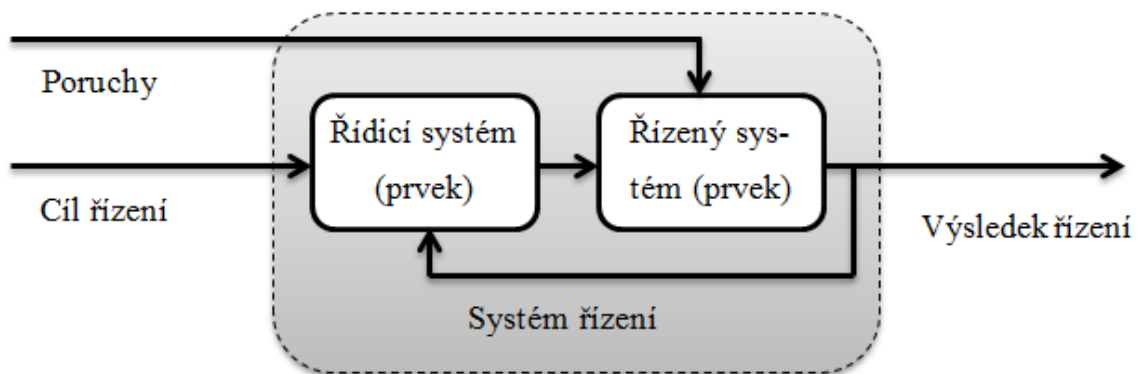
Mezi základní systémy patří dvouprvkové systémy, kdy oba prvky jsou ve vzájemné symbióze tak, aby bylo docíleno požadované vlastnosti nebo chování tohoto systému. První prvek (systém) se nazývá řídicí systém, který působí na druhý prvek (systém) označován jako řízený systém. Taková vzájemná spolupráce je známa pod pojmem systém řízení.

Řízení je definováno jako účelové působení nadřazeného členu (řídicího prvku, systému) na podřazený člen (řízený prvek, systém) k dosažení určitého předepsaného cíle. Pokud je řízení prováděno obsluhou, tak se jedná o manuální řízení. Naopak jestliže se jedná o samočinné řízení, tedy řízení je uskutečněno umělým prvkem (systémem), tak se jedná o automatické řízení, dále už jenom řízení.

Rozeznávají se dva základní druhy řízení. Jedná se o řízení přímovazební, označováno také jako ovládání, a zpětnovazební, spíše známé pod pojmem regulace.



Obrázek 1 Přímovazební řízení (ovládání)



Obrázek 2 Zpětnovazební řízení (regulace)

Nyní budou rozebrány další veličiny, které působí na systém řízení. Vstupní veličiny lze rozdělit na akční a poruchové veličiny. Akční veličiny jsou výstupními veličinami z řídicího systému, které působí na řízený systém tak, aby bylo docíleno požadovaného chování. Poruchové veličiny jsou ve většině případů nežádoucí signály vstupující do systému řízení. O těchto veličinách je známo, že vstupují do systému, avšak není možné je řídit. Tyto veličiny mají nejčastěji stochastický charakter. Poruchovým veličinám je možno předcházet a to tak, že budou měřeny a následně řídicí prvek vhodně přizpůsobí akční zásah nebo v horším případě jsou poruchové veličiny řádně identifikovány a řídicí systém s nimi dopředu počítá. V některých případech není nutné kompenzovat vliv poruch, protože samotné poruchy nemají velký dopad na řízení.

Stavové veličiny se vyskytující uvnitř řízeného systému. Většina těchto veličin nebývá měřena, protože nejsou podstatné pro řešení našeho problému a ani ho nijak neovlivňují nebo je náročné je měřit. Měřitelné stavové veličiny se stávají často výstupními veličinami, tedy jsou předmětem zájmu. Toto tvrzení se netýká abstraktních systémů.

Výstupní veličiny musejí být vždy měřitelné a měřené. Některé však poskytují pouze informace o probíhajícímu procesu, ale nejsou z hlediska procesu podstatné. Tyto veličiny jsou označovány jako vedlejší výstupní veličiny. Ostatní výstupní veličiny, které jsou předmětem zkoumání (řízení), jsou pro průběh procesu rozhodující, nazýváme řízené výstupní veličiny.

Každý systém může být reprezentován více vstupních, výstupních či stavových veličin.

Definice těchto veličin:

$$u^T = (u_1, u_2 \dots u_{m1})$$

Akční veličiny

$$v^T = (v_1, v_2 \dots v_{m2})$$

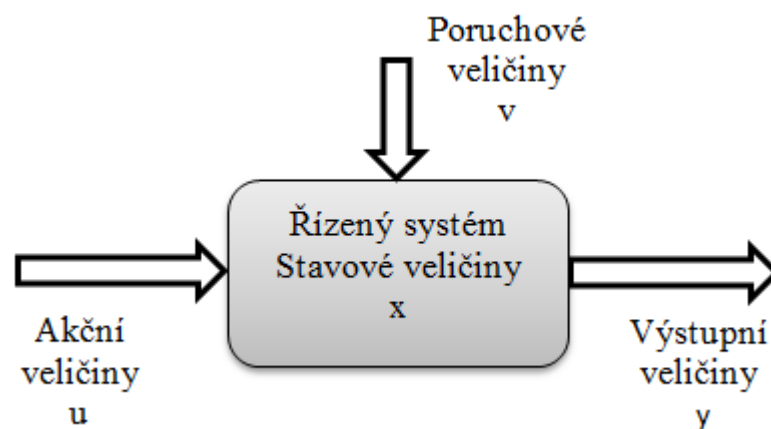
Poruchové veličiny

$$x^T = (x_1, x_2 \dots x_n)$$

Stavové veličiny

$$y^T = (y_1, y_2 \dots y_r)$$

Výstupní veličiny



Obrázek 3 Vztah jednotlivých veličin na řízený systém

Většina reálných systémů patří do skupiny dynamických systémů. Tedy systémů, které se mění v čase, přesněji řečeno jejich veličiny. Aktuální stav systému nezávisí pouze na aktuálním vstupu, ale závisí na historii těchto vstupů a počátečním stavu systému. Pokud se bude přivádět konstantní vstupní veličina dostatečně dlouho, výsledkem bude ustálená výstupní veličina. V takovém případě se mluví o ustáleném stavu. Je třeba zmínit, že ne u všech systémů se může docílit ustáleného stavu. Závislost těchto ustálených stavů na vstupních veličinách vytváří tak zvanou statickou charakteristiku. [7]

## 2 IDENTIFIKACE

### 2.1 Základní přístupy k identifikaci

K identifikaci úlohy můžeme přistupovat dvěma základními přístupy. Jedná o analytický přístup a přístup experimentální.

#### 2.1.1 Analytický přístup

Někdy označován jako „White box“ (Bílá skříňka). Základem analytického přístupu je znalost fyzických, chemických či jiných parametrů daného problému, z kterých dostáváme vztahy mezi jednotlivými sledovanými veličinami. Na základě získaných dílčích vztahů

se sestaví matematický model daného problému. Tento model matematicky kopíruje strukturu reálného problému a tím nám ho umožňuje lépe pochopit a poznat. Přesnost modelu je dána přesností popisu jednotlivých parametrů, které mají vliv na zkoumanou veličinu.

Výhodou tohoto přístupu je znalost dynamických vlastností na základě znalosti vnitřní struktury objektu. Můžeme tedy sledovat stavové proměnné, které se mění v závislosti na vstupních či výstupních veličinách. Mohou se optimalizovat či přizpůsobovat jednotlivé konstrukční parametry, to je velmi vhodné při návrhu či realizaci daného problému, protože se může docílit žádaného chování objektu. Tedy analytickou metodou získáváme stavový popis i popis vnější.

Avšak analytický přístup přináší i nevýhody. Pokud se předpokládá vysoká míra podobnosti mezi matematickým modelem a vzniklým objektem, tak je důležité analyzovat jednotlivé fyzické či chemické pochody velmi důkladně a pečlivě. Některé jevy jsou však tak složité, že je třeba je vhodně zjednodušovat. Mnohdy se také vyskytují v objektu stochastické jevy, které návrh modelu velmi stěžují nebo nejsou vůbec uvažovány.

Analytický přístup se tedy využívá především u návrhu nových technologických procesů.  
[2]

#### 2.1.2 Experimentální přístup

Výsledkem experimentálního přístupu je tzv. Black box model (černá skříňka). Jeho chování se neurčuje podle fyzikálních či chemických vlastností, ale informace o objektu se získávají v průběhu jeho experimentálního pozorování. Na základě vstupně-výstupní charakteristiky se sestavuje model systému. Tedy na vstup je přivedena změna vstupního

parametru a následně je sledována změna zkoumané výstupní veličiny. Souvislost mezi takto získaným modelem a jeho fyzikálními parametry není přímo zřejmá.

Výhodou je zahrnutí některých vlastností systému do modelu, kdežto u analytického přístupu by je bylo velmi náročné odhadnout. Jedná se zejména o náhodné jevy, neznámé náhodné veličiny vstupující do systému nebo případně některé vlastnosti objektu, které se mění předem neznámým způsobem.

Nicméně experimentální způsob si sebou nese některé nevýhody a úskalí. V každém případě musí být výstupní veličina zkoumaného objektu měřitelná nějakým způsobem. Další nevýhoda spočívá v neznalosti vnitřní struktury systému. Další podstatná nevýhoda je, že takto získaný model nemá obecnou platnost, ale platí jen pro třídu vstupních signálů, které byly použity pro jeho získání.

U experimentální metody se předpokládá existence objektu, který se identifikuje. [2]

### **2.1.3 Identifikace v praxi**

V praxi se nejvíce využívá kombinace obou metod. Čili analytickým přístupem se vytvoří hrubý odhad chování zkoumaného objektu. Následně je aplikována experimentální metoda, která vzniklý model zpřesňuje a doplňuje informace, jež z analytického hlediska nebyly zřejmé. Další možností je vytvoření modelu na základě analytického přístupu, který se pak porovnává s modelem vytvořeným experimentálním přístupem. Takovým to přístupem vznikne zpřesněný model zahrnující veškeré nebo alespoň většinu jevů vyskytujících se v daném objektu. Kombinací je zaručeno hlubší poznání zkoumaného objektu, jsou odstraněny nevýhody obou metod. [2,8]

## **2.2 Matematický model a Modelování**

Pro efektivní řízení je potřeba vlastnosti objektu dostatečně znát. Velký zájem se tedy věnuje matematickým modelům, které umožňují objekt dobře poznat a mohou poskytnout dostatečné informace pro návrh optimálního algoritmu pro řízení daného objektu.

Proces tvorby modelů se nazývá modelování. Při modelování objektu se popis jeho vlastností často zjednodušuje a mnoho jeho nepodstatných vlastností se zanedbává, protože třeba nemají vliv na zkoumaný problém (veličinu) a navíc by výsledný model mohl být zbytečně složitý a těžkopádný. Nicméně musí obsahovat všechny podstatné pochody, které by mohly ovlivňovat pozorovanou vlastnost či vlastnosti.

Konečný model se stává dostatečným, pokud aproximuje reálný systém, čili kopíruje jeho chování do určité míry, která je stanovena minimálním kritériem, určeném dle potřeby (závisí, k jakému účelu bude daný model používán). [2]

### 2.2.1 Klasifikace modelů

Existuje mnoho hledisek jak se dívat na daný model, ale všechny nějak souvisí se skutečností. Zde budou uvedeny pouze nejzákladnější modely.

Z hlediska fyzikální podstaty jsou modely:

- Materiální, mají fyzikální podstatu.
- Abstraktní, jsou vytvořeny opisem obsahu nebo formy.

Další možné rozdělení:

- Morfologické, to jsou modely vytvořené z originálu tak, aby byla zachována jeho geometrická stránka.
- Kybernetické, modely vytvořené z originálu tak, aby ztotožňovaly chování originálu.

Z hlediska řízení jsou důležité kybernetické modely s kombinací s abstraktními modely, které jsou vlastně modely matematickými. Struktura i chování jsou vyjádřeny matematicky.

Dále následuje klasifikace pouze matematických modelů. Matematické modely dělí se dle časové závislosti:

- Statické, u nichž je vstupně-výstupní chování popsáno algebraickými rovnicemi, u nichž nedominuje čas jako závislá proměnná.
- Dynamické, jejichž vstupně-výstupní chování je určeno diferenciálními rovnicemi. V čase se jeho parametry či chování mění.

Z hlediska časové závislosti parametrů na čase (týkající se, zpravidla, dynamických modelů).

- Časově závislé, t-variantní
- Časově nezávislé, t-invariantní

Z pohledu linearity tedy modely, u nichž platí princip superpozice:

- Lineární, u nichž jsou vzájemné vazby mezi veličinami lineární.

- Nelineární modely charakterizují nelineární vazby mezi veličinami (postačuje jejich část)

Dále rozlišujeme modely:

- Spojitý, změny se projevují nepřetržitě.
- Nespojitý, u kterého se vzájemné změny projevují diskrétně, tedy v pevných časových okamžicích.

Rozdělení modelů vzhledem vstupně-výstupní vazby:

- Vnější, popisuje pouze charakteristiky vstupu-výstupu, tedy nezaobírá se vnitřkem (stavem) systému. Vnější popis je typický pro experimentální metodu identifikace.
- Vnitřní, mimo charakteristiky vstupně-výstupní popisuje také vnitřní stav systému. Jedná se o hlubší popis systému. Tento popis je bližší analytické metodě.

Dalšími typy modelů jsou:

- Parametrické
- Neparametrické

Neparametrické modely jsou z ohledu návrhu řízení a simulace těžkopádnější. Jejich chování je popsáno podle přechodových, impulsních, frekvenčních charakteristik zaznamenaných v tabulární, či jiných vhodných formách. Pokud je třeba navrhnout optimální řízení pro daný systém je tato forma nevhodná. Pro správný návrh řízení je třeba pochopit simulovat na počítači, aby bylo docíleno vhodného chování řídicího algoritmu. A jelikož neparametrický model je definován mnoha hodnotami, tak je náročný na paměť počítače a také je velmi nepřizpůsobivý. Naopak výhodou neparametrického modelu je, že není potřeba znát vnitřní strukturu.

Naopak parametrický model je vyjádřen analytickými funkcemi nezávislých proměnných a konečného počtu parametrů. To znamená, že pro popis dynamických vlastností objektu není nutný velký objem dat, vystačí pouze znalost parametrů, což je velice vhodné pro modely vytvořených na počítačích. Neparametrické modely se dále používají jako mezivýsledky stávajícího parametrického modelu, sloužící k jeho ladění.

Z hlediska změn hodnot sledovaných parametrů objektu dělíme modely:

- Se soustřednými parametry, hodnoty parametrů jsou stejné v celém objektu

- S rozloženými parametry, hodnoty parametruů v objektu se mění (např.: v závislosti na poloze)

Z hlediska chování procesu, který probíhá ve zkoumaném objektu, modely dělíme na:

- Deterministické, chování procesu nebo dynamické vlastnosti můžeme předpokládat. Uvnitř systému neexistují žádné poruchy, takže chování výstupu je ovlivněno pouze vstupem a jeho historií.
- Stochastické, náhodné veličiny známého i neznámého charakteru vstupující do systému (okolní podmínky systému) nebo náhodné veličiny vyskytující se přímo uvnitř systému. Nelze přesně určit jeho chování. Takové to systémy jsou v praxi běžnější než systémy s deterministickým charakterem. [2,6,7]

### 2.2.2 Postup modelování dynamických systémů

Uvedu pouze jeden postup modelování, které model popisuje na základě bilančních rovnic. Výsledkem je stavový model, který nám udává vztahy mezi dílčími vnitřními pochody a jejich vliv na výstupní veličinu.

Každý analytický model se začíná sestavovat formálním popisem objektu modelování. Typicky se k tomuto účelu používá blokové schéma. Následuju analyzování jednotlivých elementárních dějů vyskytující se v systému nebo vlivu okolí na systém, které jsou předmětem modelování. Postup modelování lze rozdělit do tří částí.

První část spočívá ve výběru veličin a jejich vzájemných vztahů, podle kterých je možno dostatečně přesně popsat sledovaný systém a jeho chování. Nyní je třeba aplikovat první zjednodušení. Veličiny, které vůbec neovlivňují nebo minimálně ovlivňují daný proces, jsou zanedbány.

Další fází je sestavení obecných závislostí mezi vybranými veličinami. Zde se vytváří struktura matematického modelu, které se stanovují na základě fyzikálních zákonů nebo ze zákonů odvozených. Nejčastěji využívané zákony při modelování:

- Zákony typu zachování. Všeobecný tvar zachování:

$$\sum \text{přítoků} + \sum \text{zdrojů} - \sum \text{odtoků} - \sum \text{zániků} = \text{časová změna akumulace}$$

Jedná se o bilanční rovnici, která se aplikuje na tok určité formy energie nebo hmoty objevující se v objektu nebo v jeho okolí. Přítoky se rozumí množství veličiny vstupující do systémů, odtoky značí zase množství veličiny vystupující ze systému.

Zdroji a zániky je myšlena změna energie, tedy změna množství zkoumané veličiny v důsledku procesů vyskytujících se uvnitř nebo v okolí systému (například chemická reakce). Pokud je proces ustálený, tak je levá strana rovnice rovna nule.

- Zákony typu sdílení. Jsou využívány při nevratných procesech. Je třeba je popsat zákonem typu sdílení:

$$\text{tok} = \text{součinitel přenosu} \times \text{gradient určujícího parametru}$$

Součinitel přenosu reprezentuje převrácenou hodnotu odporu sdílení. Gradient nám udává směr šíření. Tyto zákony se uplatňují, pokud je potřeba popsat například Fourierův zákon sdílení tepla.

- Stavové rovnice. Existují-li ve vyšetřovaném systému více veličin navzájem nezávislých a působící na chování systému, tak je třeba sestavit stavové rovnice a určit vztahy mezi stavovými veličinami. Jedná se o například stavové rovnice plynů a par.
- Bilance entropie. Pokud se v systému objevuje více nevratných procesů, tak je třeba použít bilanci entropie (neurčitosti).

V bilanci se mohou vyskytnout různé typy rovnic. Pokud se bude jednat o jednoduchý proces nebo proces, který bude hodně zjednodušen, bude popsán jednoduššími rovnicemi než systém složitý.

Algebraickými rovnicemi bude popsán systém stacionárního procesu. Bude se jednat o model popisující statické chování, tedy půjde o ustálený stav se soustřednými parametry.

Obyčejnými diferenciálními rovnicemi je popsán model, který je závislý pouze na jedné proměnné. Tedy jedná se o popis jeho dynamických vlastností (proměnná čas) se soustřednými parametry anebo půjde o stacionární systém s rozloženými parametry (prostorová proměnná). U těchto případů je nutné určit počáteční podmínky.

Posledním typem užívaných rovnic jsou parciální diferenciální rovnice, které se používají k popisu ostatních systémů. Pokud se však bude jednat o nestacionární systém s rozloženými parametry, je nutné určit, kromě počátečních podmínek, i okrajové podmínky.

Třetí fází analýzy je specifikace modelu. Neznámé parametry modelu se konkretizují pro určitý reálný systém. [2]

## 2.3 Vnitřní popis dynamického systému

Předchozí kapitola popisovala, jak získat matematický model. Nyní se budu věnovat stavovým popisům lineárních a nelineárních spojitéch dynamických systémů.

### 2.3.1 Stavový popis nelineárního spojitého dynamického systému

Nelineární spojité systém je obecně definován stavovou rovnicí.

$$\frac{dx(t)}{dt} = f[t, x(t), u(t)] \quad (1)$$

Je dána počáteční podmínka  $x(0) = x^s$ . Výstupní rovnice je ve tvaru.

$$y(t) = g[t, x(t), u(t)] \quad (2)$$

Jednotlivé vektory jsou ve tvaru:

|                              |                           |
|------------------------------|---------------------------|
| $u^T = (u_1, u_2 \dots u_m)$ | Vektor vstupních veličin  |
| $x^T = (x_1, x_2 \dots x_n)$ | Vektor stavových veličin  |
| $y^T = (y_1, y_2 \dots y_r)$ | Vektor výstupních veličin |

Nelineární vektorové funkce jsou  $f$  a  $g$ .

$$f^T = (f_1, f_2 \dots f_n)$$

$$g^T = (g_1, g_2 \dots g_r)$$

Jedná se o nelineární t-variantní systém. Pokud funkce nebudou explicitně záviset na čase, tak výsledkem bude t-invariantní systém.

Předpokládáme, že funkce  $f$  a  $g$  jsou spojitě diferencovatelné a existují spojitě parciální derivace podle prvků vektorů  $u$  a  $x$ .

Jestliže výstupní funkce  $y$  závisí pouze na aktuálních hodnotách stavových veličin  $x$ , tak systém splňuje silnou podmínku fyzikální realizovatelnosti. Pokud výstupní funkce bude záviset i na vstupních veličinách, pak se bude jednat o slabou podmínku fyzikální realizovatelnosti. [7]

### 2.3.2 Stavový popis lineárního spojitého dynamického systému

Lineární systém je dán stavovou a výstupní rovnicí ve tvaru:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) \quad (3)$$

$$y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t) \quad (4)$$

$$A(t) = \begin{bmatrix} a_{11}(t) & \cdots & a_{1n}(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1}(t) & \cdots & a_{nn}(t) \end{bmatrix}, \text{matice systému } (n \times n) \quad (5)$$

$$B(t) = \begin{bmatrix} b_{11}(t) & \cdots & c_{1m}(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1}(t) & \cdots & c_{nm}(t) \end{bmatrix}, \text{matice vstupu } (n \times m) \quad (6)$$

$$C(t) = \begin{bmatrix} c_{11}(t) & \cdots & c_{1n}(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{r1}(t) & \cdots & c_{rn}(t) \end{bmatrix}, \text{matice systému } (r \times n) \quad (7)$$

$$D(t) = \begin{bmatrix} d_{11}(t) & \cdots & d_{1m}(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{r1}(t) & \cdots & d_{rm}(t) \end{bmatrix}, \text{matice systému } (r \times m) \quad (8)$$

Jestliže aspoň některé prvky matic  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  jsou proměnné v čase, tak se jedná o t-variantní systém a naopak. Pokud je matice  $D$  nulová, pak výstup systému bude závislý pouze na stavových veličinách, tedy systém bude splňovat silnou podmínku realizovatelnosti. [7]

### 2.3.3 Linearizace modelu

Většina reálných dynamických procesů je popsána nelineárními diferenciálními rovnicemi. A jelikož analytické řešení nelineárních rovnic v mnoha případech neexistuje a musejí se používat numerické metody, tak se nabízí myšlenka nelineární dynamický model popsat lineárními diferenciálními rovnicemi s rozumnou tolerancí. Je třeba nalézt kompromis mezi přesností a jednoduchostí modelu. Pro linearizace se využívá rozkladu nelineární rovnice podle Taylorova rozvoje a zanechají se pouze první dva lineární prvky rozvoje.

Rovnice, které popisují systém, musí být spojitě diferencovatelné a musí existovat první parciální derivace podle prvků vektoru stavu a vstupu.

Mějme mnohazměrový nelineární model popsaný stavovou rovnicí (totéž platí i pro výstupní rovnicí)

$$\dot{x}' = f(x', u') \quad (9)$$

a jeho počáteční podmínkou

$$x'(t_0) = x^s \quad (10)$$

, kde vektor stavu a vstupu vyjadřují stav a vstup v linearizovaném modelu. Vztah mezi rovnicí vstupu a výstupu musí mít lineární charakter (jinak se linearizace musí provést). Hlavním předpokladem je, že změny systému se bude pohybovat kolem ustálené hodnoty dané veličiny, tedy kolem nějakého pracovního bodu. Ustálené hodnoty se získají z rovnice  $f(x'^s, u'^s) = 0$ , kde změny budou nulové, tedy derivace budou rovny nule.

Z ustálených hodnot se vytvoří odchylový model, kde změny hodnot vstupních a stavových veličin budou vnímány jako odchylky od ustálených hodnot.

$$x(t) = \Delta x'(t) = x'(t) - x'^s \quad (11)$$

$$u(t) = \Delta u'(t) = u'(t) - u'^s \quad (12)$$

Následuje zmíněný Taylorův rozvoj, kde jsou využity právě dva členy.

$$\begin{aligned} & f(x'(t), u'(t)) \\ & \approx f(x'^s, u'^s) + \left(\frac{\partial f}{\partial x'}\right)^s (x'(t) - x'^s) + \left(\frac{\partial f}{\partial u'}\right)^s (u'(t) - u'^s) \end{aligned} \quad (13)$$

Parciální derivace s označením „s“ značí hodnotu výrazu v pracovním bodě. Tedy změna stavových veličin je vyjádřena jako parciální derivace veškerých stavových funkcí podle veškerých stavových a vstupních veličin, protože pro odchylku funkce  $f$  platí:

$$\Delta f(x', u') = f(x', u') - f(x'^s, u'^s) \quad (14)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x'} = \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_j'}\right), i, j = 1, \dots, n, \quad \frac{\partial f}{\partial u'} = \left(\frac{\partial f_i}{\partial u_j'}\right), i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m \quad (15)$$

Po dosazení získáme:

$$\Delta f(x'(t), u'(t)) = \left(\frac{\partial f}{\partial x'}\right)^s x(t) + \left(\frac{\partial f}{\partial u'}\right)^s u(t) \quad (16)$$

Následně dosadíme do rovnice (9), pak tedy bude platit:

$$\Delta \dot{x}' = \Delta f(x', u') \quad (17)$$

Po dosazení získáme stavovou rovnici linearizovaného modelu [3,8]

$$\dot{x}(t) = A^s x(t) + B^s u(t), \quad \text{kde } x(0) = 0 \quad (18)$$

## 2.4 Experimentální metody identifikace

Zde se budu zabývat pouze některými metodami identifikace, které budou použity v praktické části. Využiji metody, které se nejvíce osvědčily v průběhu mého studia automatizací. Tedy výhradně se budu věnovat identifikaci využívající dynamických diskrétních modelů, které umožňují identifikaci stochastických procesů.

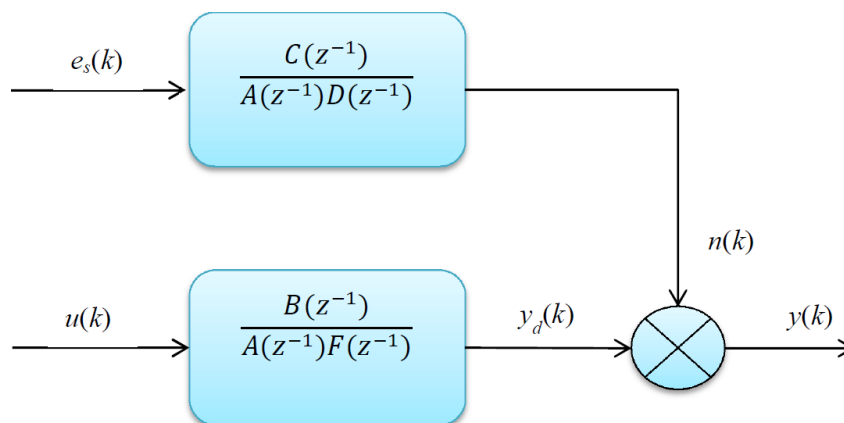
### 2.4.1 Metoda nejmenších čtverců

#### 2.4.1.1 ARX model

Je nejpoužívanější diskrétní model popisující chování dynamického systému. Obecně při tvorbě modelu se hledá taková funkce, která odpovídá výstupní veličině v závislosti na vstupní veličině a poruchové veličině. Poruchová veličina je myšlena například jako chyba měření. Velmi obecně lze systém popsat jako funkci posloupností naměřených veličin.

$$y(k) = f[y(k-1), y(k-2), \dots, y(k-na), u(k-1), u(k-2), \dots, u(k-nb), v(k-1), v(k-2) \dots, v(k-nd), k] + n(k) \quad (19)$$

Vektory  $y(k)$  a  $u(k)$  vyjadřují výstupní a vstupní veličiny v  $k$ -tém kroku měření. Vektor  $v(k)$  označuje poruchovou veličinu a dále pak vektor  $n(k)$  reprezentuje náhodné vlivy (např. změna počasí, tedy tlaku, teploty aj.). Pokud při matematickém popisu je požadováno brát v úvahu náhodné vlivy, tak jsou reprezentovány jako bílý šum (náhodný signál s normálním rozložením). Aby se náhodný signál dále mohl zapojit do matematického modelu, je vhodné ho filtrovat, tak aby bylo dosaženo charakteru bílého šumu  $n(k)$ .



Obrázek 4 – Blokové schéma obecného stochastického procesu

Veličina  $y_d(k)$  reprezentuje deterministické chování soustavy

Výsledná rovnice odvozena z blokového schématu je:

$$y(k) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})F(z^{-1})} u(k) + \frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})D(z^{-1})} e_s(k) \quad (20)$$

V modelu ARX jsou polynomy  $F(z^{-1}) = D(z^{-1}) = D(z^{-1}) = 1$ . Tedy deterministická soustava a soustava náhodných vlivů mají stejné dynamické vlastnosti. Dále pak filtr neovlivňuje velikost hodnoty ani fázovost vstupní složky náhodné veličiny. [1,2]

#### 2.4.2 Princip metody nejmenších čtverců

Metoda nejmenších čtverců patří mezi identifikační metody regresní analýzy. MNC je velice účinná při vyšetřování statických i dynamických vztahů mezi veličinami zkoumané soustavy. Při identifikaci je možné využít právě zmíněný ARX model. Pro jednoduchost bude použit jednorozměrný stochastický proces.

$$\theta^T(k) = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n \ b_1 \ b_2 \ \dots \ b_n] \quad (21)$$

Zde je uveden vektor odhadů parametru vyšetřované soustavy. Následuje vektor naměřených hodnot.

$$\phi = [-y(k-1) \ -y(k-2) \ \dots \ -y(k-n) \ u(k-1) \ u(k-2) \ \dots \ u(k-n)] \quad (22)$$

Pak výstupní hodnotu v jednotlivých časových okamžicích lze vyjádřit rovnicí

$$y = F\theta + e \quad (23)$$

, kde rozměr vektoru náhodné složky a vektoru výstupních hodnot je  $(N-n)$  a rozměr matice  $F$  je  $(N-n-d, 2n)$ .  $N$  určuje počet naměřených vzorků a  $n$  je řád vyšetřované soustavy a  $d$  je počet kroků dopravního zpoždění. Matice  $F$  a vektory  $y$  a  $e$  jsou pak ve tvaru

$$y^T = [y(n+1) \ y(n+2) \ \dots \ y(N)] \quad (24)$$

$$e^T = [e(n+1) \ e(n+2) \ \dots \ e(N)] \quad (25)$$

$$F = \begin{bmatrix} -y(n) & -y(n-1) & \dots & -y(1) & u(n) & u(n-1) & \dots & u(1) \\ -y(n+1) & y(n) & \dots & -y(2) & u(n+1) & u(n) & & u(2) \\ \vdots & & & & & & & \vdots \\ -y(N-1) & -y(N-2) & \dots & -y(N-n) & u(N-1) & u(N-2) & \dots & u(N-n) \end{bmatrix} \quad (26)$$

Dále se zavede kritérium, jehož minimum je výsledný výpočet odhadu parametrů identifikované soustavy.

$$J = e^T e = (y - F\theta)^T (y - F\theta) \quad (27)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \theta} = 0 \Rightarrow \theta = (F^T F)^{-1} F^T y \quad (28)$$

Výsledným vztahem lze jednoduše vypočítat parametry vyšetřované soustavy s použitím  $N$  naměřených vzorků. [1,2]

### 2.4.3 Průběžná metoda nejmenších čtverců

Výhodou průběžných (rekurzivních) identifikačních metod je identifikace za chodu reálného procesu. Tyto metody otvírají nové možnosti v oblasti regulace a řízení. Výsledkem mohou být velice flexibilní a robustní regulátory. Obecný princip průběžných identifikačních metod je, že se v každém kroku vypočítá odlišnost reálného a identifikovaného procesu, tedy v každém kroku probíhá oprava chyby.

Samotná průběžná metoda nejmenších čtverců, stejně jak klasická MNC, se snaží najít minimum kritéria  $J$ , tedy najít správné parametry soustavy.

$$J_k(\theta) = \sum_{i=k_0}^k e^2(i) \quad (29)$$

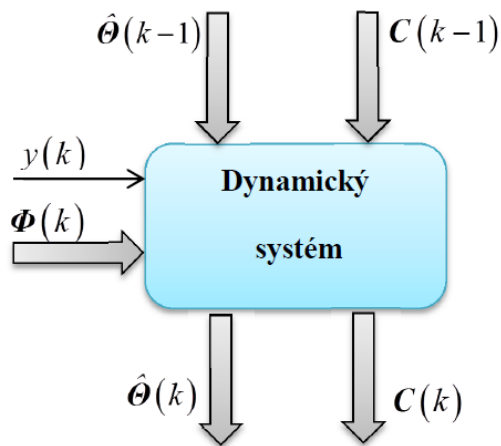
Kde  $k$  značí časový okamžik a  $k_0$  je počáteční čas identifikace a  $e$  značí chybu.

Model ARX modelu lze popsat rovnicí

$$\begin{aligned} \hat{y}(k) = & -a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) - \dots - a_n y(k-n) + b_1 u(k-d-1) \\ & + b_2 u(k-d-2) + \dots + b_m u(k-d-m) + e_s(k) \end{aligned} \quad (30)$$

, nebo rovnicí ve vektorovém tvaru

$$y(k) = \phi^T(k)\theta(k) + e_s(k) \quad (31)$$



Výpočet probíhá v každém okamžiku vzorkování. Výsledný odvozený algoritmus je ve tvaru:

- Naplnění počátečních hodnot odhadu parametrů a diagonální kovarianční matice, která definuje těsnost mezi veličinami.
- Odhady parametrů se v průběhu procesu určují následovně

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{C(k-1)\phi(k)}{1 + \xi(k)} \hat{e}(k) \quad (32)$$

$$\xi(k) = \phi^T(k)C(k-1)\phi(k) \quad (33)$$

$\hat{e}(k)$  je chyba predikce definována vztahem

$$\hat{e}(k) = y(k) - \hat{y}(k) \quad (34)$$

- Kovarianční matice je také funkcí času (kroku), tedy její rekurzivní vyhodnocení je dáno vztahem

$$C(k) = C(k-1) - \frac{C(k-1)\phi^T(k)\phi(k)C(k-1)}{1 + \xi(k)} \quad (35)$$

Existují i modifikace RMNČ, které jsou vhodné pro systémy s časově proměnnými parametry (RMNČ s exponenciálním, s adaptivním směrovým zapomením). [1,2]

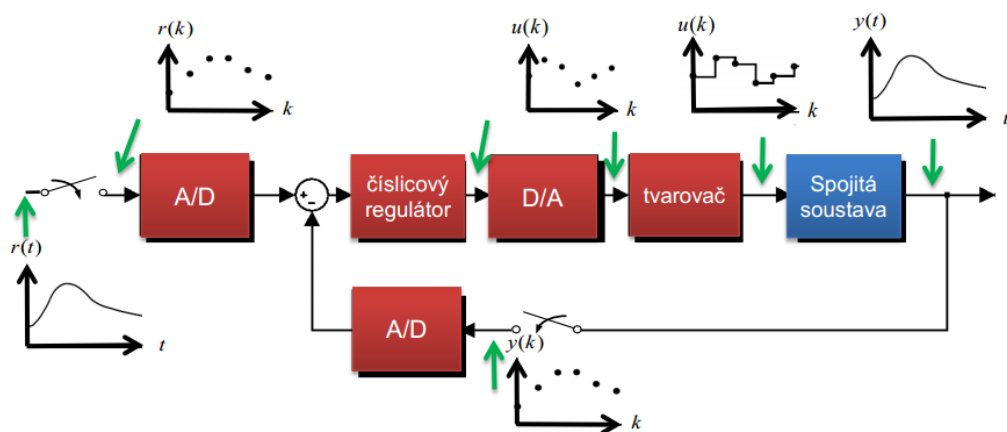
### 3 REGULÁTORY

Kapitola se zaměřuje pouze na vybrané řídicí systémy související s praktickou částí, jinak by mohla být velice rozsáhlá.

#### 3.1 Řídicí systémy spojité a diskrétní

Pozornost bude věnována především diskrétnímu popisu soustavy. Díky rychlému rozvoji počítačové techniky lze aplikovat složitě pracující algoritmy na technologický proces. Vyřešil se tím i problém regulátorů s flexibilitou, kde bylo velmi obtížné změnit jejich parametry pro řízení (např.: elektrické obvody nebo jejich části se musely nahrazovat). Spojité řídicí systémy mají výhodu v tom, že pracují spojitě, tudíž nevzniká dopravní zpoždění vlivem periody vzorkování. Naproti tomu diskrétní řídicí systémy s sebou nesou dopravní zpoždění. Vyhodnocování neprobíhá spojitě, ale v daných periodách. Tedy pokud změna žádné hodnoty proběhne v průběhu probíhající periody, řídicí systém na ni bude reagovat až po skončení periody.

V případě řízení spojitých řízených systému systémy diskrétními, je třeba tato rozdílné rozhraní vhodně propojit. Pro snímání sledované veličiny se používají senzory, jejichž výstupní signál lze převést na signál elektrický, anebo senzory, které mají přímo elektrický výstupní signál. Propojení senzoru a číslicové techniky poskytuje A/D převodník se vzorkovačem, který v určitých časových intervalech poskytuje převod analogového signálu na diskrétní signál. Následné vyhodnocení číslicovou technikou poskytuje diskrétní akční zásah, který je třeba převést na signál spojitý. Tuto funkci poskytuje D/A převodník a tvarovací člen, který udržuje konstantní hodnotu pod dobu celé periody (tvarovač nultého řádu). [2,9]



Obrázek 5 – Diskrétní řídicí systém a spojitý řízený systém [9]

Vstupně-výstupní chování spojitéch dynamických systémů je popsáno obyčejnými diferenciálními rovnicemi. Pokud jsou tyto rovnice lineární, tak je lze jednoduše řešit za pomoci Laplaceovy transformací, která umožňuje převod z oblasti časové do oblasti komplexní, kdy se diferenciální rovnice převedou na algebraické. To je velice vhodné pro syntézu regulátorů založených na vnějším popisu systému.

Vztah mezi vstupem  $u(t)$  a výstupem  $y(t)$  lineárního časově invariantního systému lze v časové oblasti popsat diferenciální rovnicí s konstantními koeficienty

$$\begin{aligned} y^{(n)}(t) + a_{n-1}y^{(n-1)}(t) + \dots + a_1\dot{y}(t) + a_0y(t) \\ = b_mu^{(m)}(t) + \dots + b_1\dot{u}(t) + b_0u(t) \end{aligned} \quad (36)$$

s počátečními podmínkami

$$y^i(0) = y_0^i, \quad i = 0, 1 \dots n - 1, \quad u^j(0) = u_0^j, \quad j = 0, 1 \dots m - 1 \quad (37)$$

a podmínkou

$$n \geq m$$

Následný vnější popis je reprezentovaný přenosovou funkcí. Přenosová funkce je dána jako podíl Laplaceových obrazů vstupů a výstupů. Přenos je racionální funkcí v komplexní proměnné  $s$ . [7]

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b(s)}{a(s)} = \frac{b_ms^m + \dots + b_1s + b_0}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0} \quad (38)$$

Pro analýzu diskretních dynamických systémů však Laplaceovu transformaci použít nelze. Proto byla vyvinuta tak zvaná „z-transformace“ jako prostředek pro řešení diferenčních rovnic. Výsledný vnější popis je mimo jiné ovlivněn právě periodou vzorkování.

Vztah mezi obrazovým přenosem spojitého dynamického systému a přenosem diskretního dynamického systému s tvarovačem nultého řádu je

$$G(z) = \frac{z-1}{z} Z \left\{ L^{-1} \frac{G(s)}{s} \right\}_{T_0} \quad (39)$$

kde „z“ je komplexní proměnná, která má význam posuvu v krocích (periodách).

$$zy(k) = y(k+1), \quad z^{-1}y(k) = y(k-1) \quad (40)$$

## 3.2 Regulátory pro systémy s neurčitými nebo časově proměnnými parametry

Způsobů, jak se vypořádat s tímto problémem, existuje více. Zmíním se pouze o základních řešeních a rozvedu pouze řešení, které budu používat v dalších částech.

Návrh řízení pomocí matematického modelu nemusí odpovídat reálnému systému. To je způsobeno mnoha důvody. Často dochází při návrhu k zanedbání okolních podmínek, k zjednodušení některých procesů probíhajících uvnitř systému nebo některé parametry nejsou předem dobře známy anebo se parametry systému postupně mění (např. v závislosti na okolních podmínkách) atd. Pokud je potřeba zohlednit tyto faktory, tak je možno aplikovat některé z následujících řešení. [3]

### 3.2.1 Robustnost řízení

Jestliže je k dispozici model, který byl při návrhu zjednodušen a je potřeba zohlednit zmíněné faktory, pak je třeba zavést do matematického modelu tak zvanou neurčitost. V podstatě místo jednoho modelu bude vytvořena celá rada modelů, jako okolí nominálního modelu, tak aby neurčitost byla odstraněna nebo alespoň kompenzována. Okolí lze definovat dvěma základními způsoby. Jde o parametrickou a nestrukturovanou neurčitost.

Parametrickou neurčitost lze použít, pokud je známa struktura modelu, ale nejsou přesně známy jeho parametry. Je definována za pomoci intervalů, které obsahují možné parametry modelu.

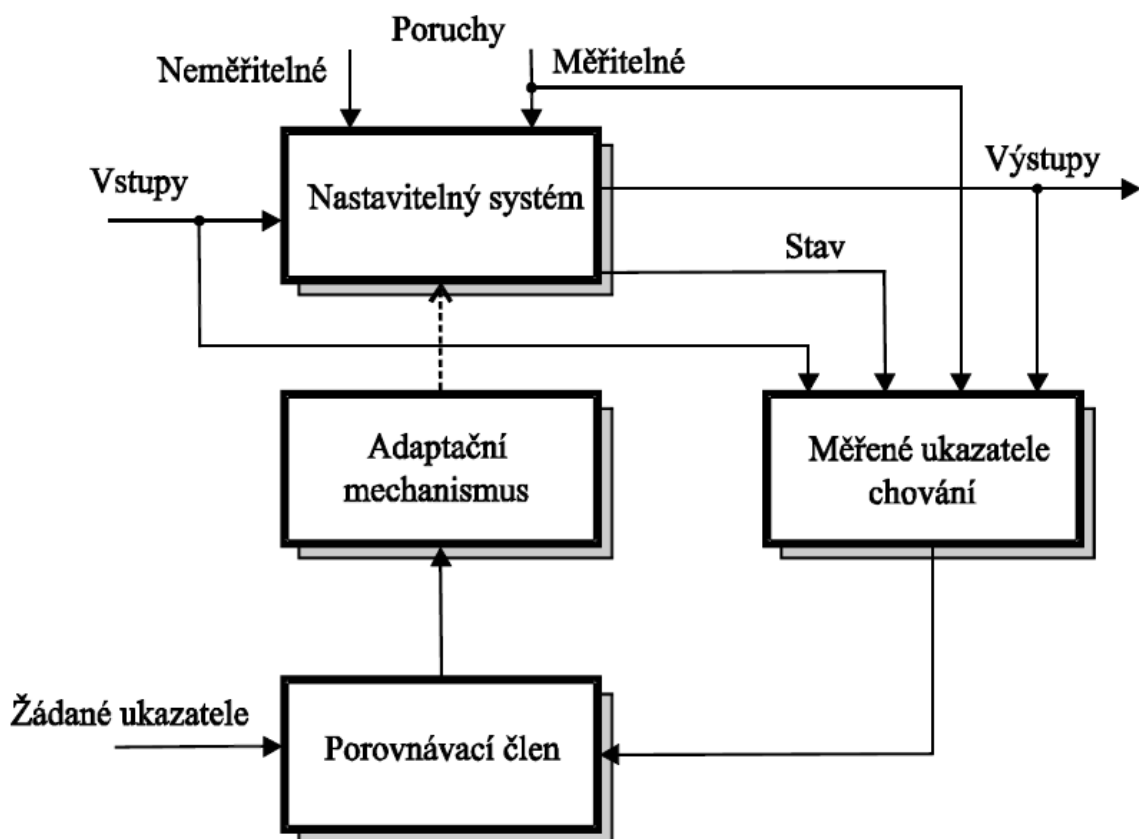
Naopak pro nestrukturovanou neurčitost není potřeba znát ani strukturu (řád) modelu (např. zanedbání dynamiky na vysokých frekvencích). Je definována pomocí omezení rozptylu frekvenčních charakteristik.

Robustnost řízení pak znamená zajištění požadovaných regulačních vlastností pro celé okolí modelu. Robustnost je dána třemi základními požadavky: robustní analýzou, hledání robustních mezí a robustní syntézou. Pod pojmem robustní analýze se skrývá analýza robustní stability (požadavek stability pro celé okolí matematického modelu) a analýza robustního chování. Hledání robustních mezí se rozumí hledání mezí, kdy je splněna robustnost. Robustní syntéza pak znamená nalezení robustního regulátoru, který zajišťuje robustní stabilitu či chování daného uzavřeného obvodu. [3]

### 3.2.2 Adaptivní řízení

Klasické regulátory pro řízení nejsou často ideální, protože mají pevně danou strukturu. Tedy když se vyskytne náhlá nebo postupná změna parametrů v důsledku například lidské chyby nebo opotřebení zařízení, pak klasický regulátor nemusí proces řídit ideálně. Právě s využitím adaptivního regulátoru se tyto „poruchy“ mohou potlačit.

Základní myšlenka přizpůsobení je inspirována živým organismem, který přizpůsobuje svoje chování podle změn okolí. Každá adaptace se projevuje nějakou ztrátou. Může jít o například o ztrátu energie nebo informace. Při opakované změně dochází k tomu, že organismu začne z vlastní zkušenosti minimalizovat tyto ztráty. Tímto procesem se rozumí učení.



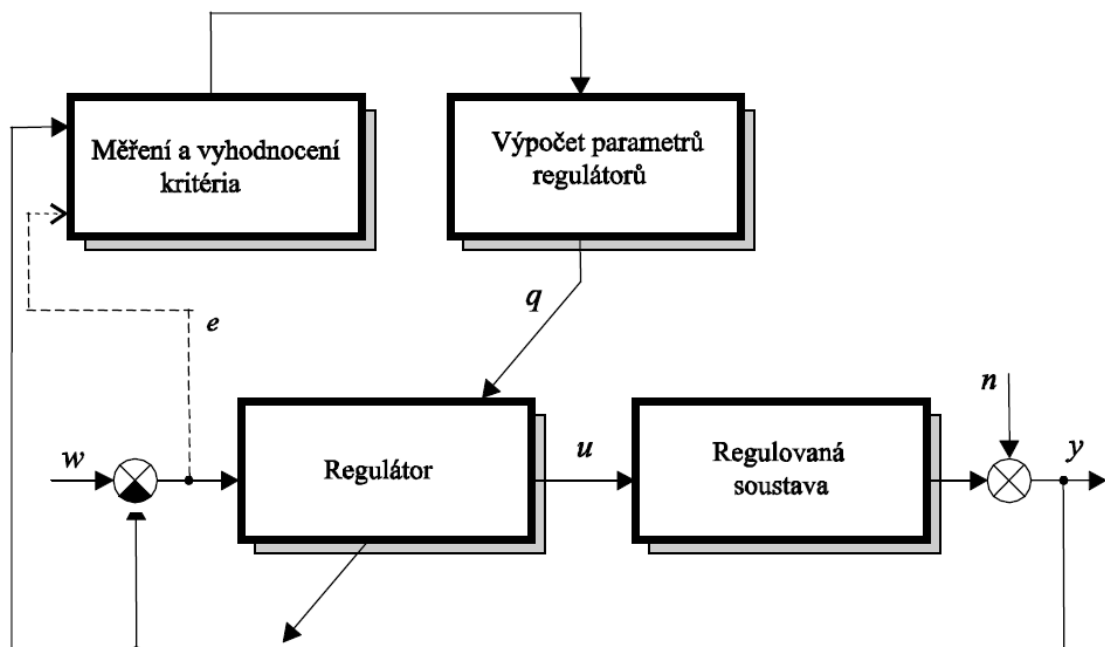
Obrázek 6 – Blokové schéma obecného adaptivního systému

Snaha adaptivního kybernetického systému je kontrolovat ukazatele chování na základě jeho vstupů, stavů nebo výstupů. Podle těchto ukazatelů se optimálně modifikují parametry nebo struktura nastavitelného obvodu nebo se dle potřeby generuje pomocný vstup, tak aby se dosáhlo požadovaného chování objektu.

Klasické regulátory obecně využívají regulační odchylku k vygenerování akčního zásahu podle jeho pevně daných parametrů. Naopak adaptivní regulátor mění způsob zpracování regulační odchylky, tedy aplikuje adaptivní zákon na nové neznámé podmínky a tím rozšiřuje oblast využití, kde dostatečně provádí regulační pochod. [1]

### 3.2.2.1 Adaptivní regulátory založené na heuristickém přístupu

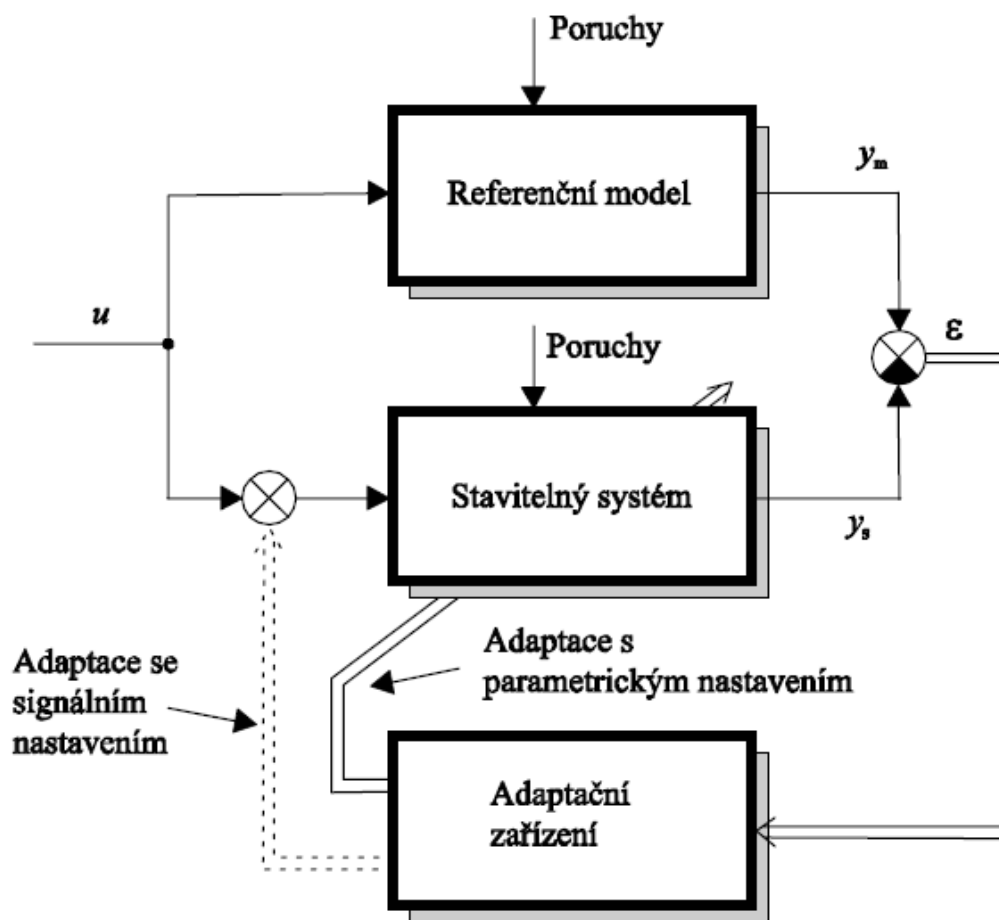
Adaptace se vyhodnocuje přímo z průběhu regulované veličiny nebo podle nějakého kritéria určující kvalitu regulačního pochodu. Kritéria jsou většinou ovlivněny kmitavostí regulované veličiny nebo její odchylky. Využívají se zde číslicové PID regulátory. Výhodou těchto metod je, že není potřeba provádět identifikaci řízené soustavy, pouze se mění parametry regulátoru. [1]



Obrázek 7 – Adaptivní regulátory založené na heuristickém přístupu

### 3.2.2.2 Adaptivní regulátory s referenčním modelem

Hlavní úlohou těchto regulátorů je snaha ztotožnit vlastnosti stavitelného systému s vlastní referenčním modelem. Důsledkem vzniká nucené chování adaptivního systému, následně se získává adaptační odchylka, která je porovnávána s referenčním modelem. Cílem celého pochodu je minimalizovat právě tuto odchylku podle daného kritéria. To se provádí buď, změnou parametrů stavitelného systému nebo vygenerováním vhodné vstupní veličiny. [1]



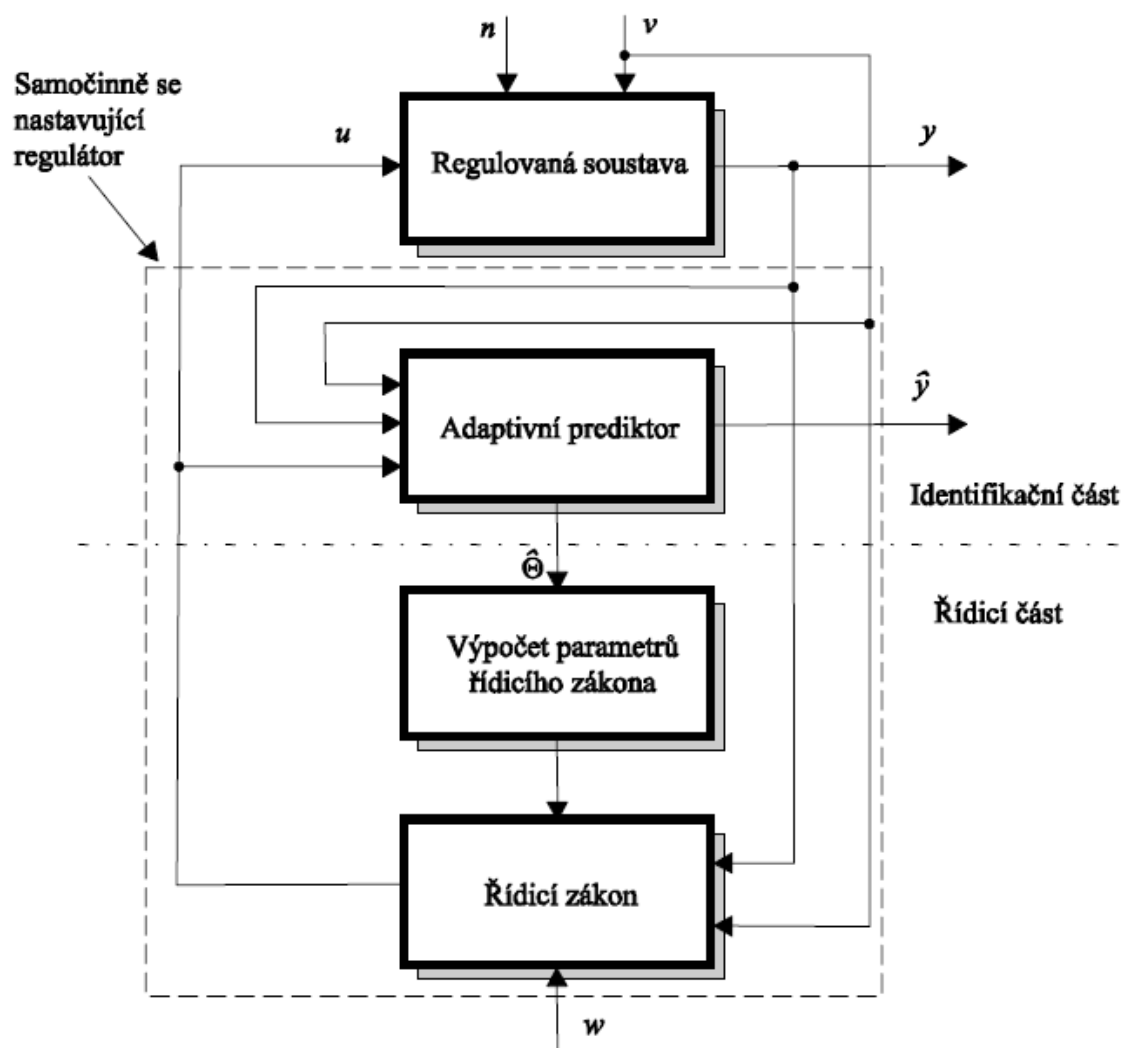
Obrázek 8 – Blokové schéma adaptivního regulátoru s referenčním modelem

### 3.2.2.3 Samočinně se nastavující regulátory

Základem je průběžné odhadování vlastností soustavy, popřípadě poruch, dle kterých se upřesňují parametry regulované soustavy. To vede k optimálnímu návrhu regulátoru pro danou soustavu. Vlastně parametry regulované soustavy nemusí být přesně známy, postačí pouze hrubý odhad jeho chování. Anebo parametry jsou proměnné a adaptivní regulátor mění svůj akční zásah v závislosti na změně, avšak změna parametrů by měla být podstatně pomalejší než proces adaptace.

Požadavky na samočinně se nastavující regulátory:

- Automatické seřízení číslicového regulátoru
- Zkvalitnění regulace při výskytu nestacionárních poruch
- Zachycení změn parametrů řízené soustavy
- Následné zkvalitnění regulačního pochodu [1]



Obrázek 9 – Vnitřní struktura samočinně se nastavujícího regulátoru

## 4 SENZORY A AKČNÍ ČLENY

### 4.1 Platinové senzory teploty

#### 4.1.1 Obecné specifikace odporových senzorů

Pokud je přivedeno elektrické napětí do elektrického obvodu, tak vzniká pohyb nábojů látkových částic prvků v obvodu, tedy elektrického proudu. Velikost proudu je dáno jako množství kladného náboje procházející průřezem prvku za jednotku času. Elektrický proud je prostorový děj až na některé případy.

Pokud prochází materiálem (kov, polovodič, elektrolyt) elektrický proud, tak vzniká elektrický odpor. U odporových senzorů je odpor materiálu ovlivňován vnějším podmínkem (teplota, světlo, magnetické pole). Odpor se mění v důsledku změny průřezu, délky nebo měrného odporu.

**Odporové senzory** se řadí mezi pasivní senzory, jelikož vnější podmínky mění vlastnosti použitých materiálů. Aby bylo možné měřit tuto změnu, je nutné přidat pomocné na pájecí napětí.

V případě **odporových senzorů teploty** je využíváno změny elektrického odporu v závislosti okolní teploty. Senzor se tak stává součástí procesu přenosu tepla vedením, prouděním nebo přijímání energie prostřednictvím sáláním z okolního tělesa. U těchto senzorů je důležité, aby byly fyzikálně i chemicky stálý v daném rozsahu teplot. Změna elektrického odporu je dána změnou velikosti amplitudy kmitajících částic uvnitř materiálu, tedy čím je teplota vyšší, tím se zvyšuje šance na srážku elektronů a iontů a v důsledku toho se zkracuje volná dráha elektronů a tím klesá elektrická vodivost (elektrický odpor roste). [4]

#### 4.1.2 Platinový senzor

**Platinové odporové senzory teploty** se využívají především pro svoji vysokou chemickou stálost, vysokou teplotou tavení a možnost dosažení dobré čistoty. Platina je vhodná pro měření teplot v rozsahu od  $-200^{\circ}\text{C}$  až do  $860^{\circ}\text{C}$ . Procházející proud by neměl být vyšší než je 1 mA, protože by se senzor mohl začít zahřívat a tak zapříčinit nepřesnosti v měření. Charakteristika odporu v závislosti na teplotě má mírný kvadratický průběh pro teploty nad  $0^{\circ}\text{C}$  a mírný kubický průběh pro záporné teploty.

$$R = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (41)$$

Kde  $R_0$  je odpor při  $0^\circ\text{C}$ ,  $t$  je teplota  $A$  a  $B$  jsou koeficienty funkce odpovídající změně odporu. Platí pro kladné teploty.

$$R = R_0(1 + At + Bt^2 + Ct^3(t - 100)) \quad (42)$$

Platí pro záporné teploty. [4]

#### 4.1.2.1 Typy platinových senzorů vhodné pro použití v chemické laboratoři

**Platinové odporové senzory s jímkou** jsou vhodné pro měření teploty plynných i kapalných médií. Využívají se především v energetice nebo v chemickém průmyslu. Tyto snímače jsou opatřeny upevňovacím šroubením, které pak slouží k upevnění do potrubí. Při vhodném materiálu jímky lze snímače použít pro různá agresivní média.

**Odporové snímače teploty do jímky** jsou používány v obdobných aplikacích jako u senzorů s jímkou, avšak u těchto není snímač pevně spojen s jímkou. Jímka se vybírá dle aplikace a následně se zabuduje do potrubí nebo do prostoru, kde je vyžadováno měření. [10]



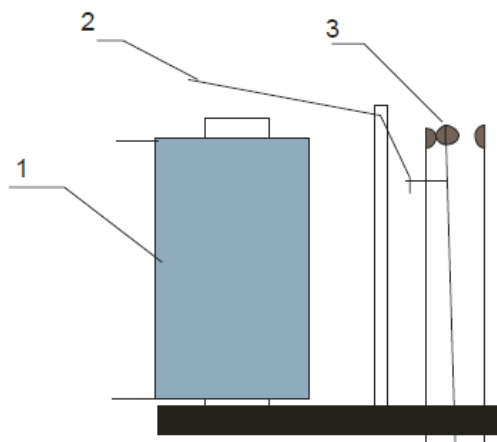
Obrázek 10 – Teplotní snímače, vlevo do jímky, vpravo s jímkou

## 4.2 Relé A stykače

### 4.2.1 Elektromagnetické relé

Jedná se o základní prvky pro nespojitě ovládání elektrické energie. Klasická relé se spínají elektromechanicky za pomoci cívky a takzvaných jazýčků. Cívka bývá konstruována na napětí od 3V. Napětí spínané i řídicí může být jak stejnosměrné tak spínané. Spínané napětí bývá 230V a spínaný proud může dosahovat až desítek ampér. Důležitým parametrem je mezní frekvence spínaného napětí, nesmí být překročena, jinak kontakty mohou

odskakovat. Nevýhodou jsou mechanické části, které se časem opotřebovávají v závislosti na velikosti spínaného proudu a napětí.



Obrázek 11 - Schéma elektromagnetického přepínacího relé

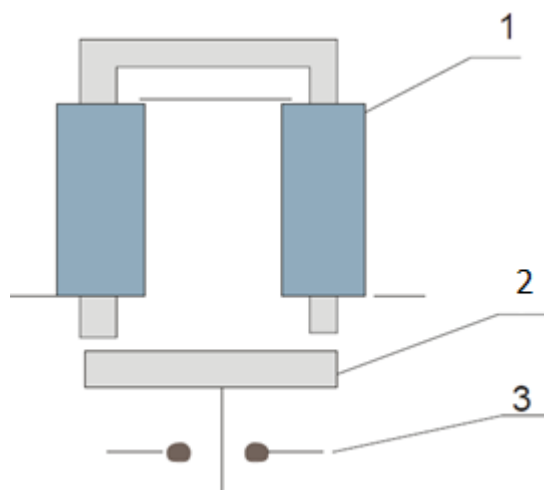
Cívka (1) při sepnutí přitáhne kotvu (2) a tím dojde k přepnutí kontaktů (3). Spínací a rozpínací relé vypadají podobně, avšak obsahují pouze jeden kontakt. [5]

#### 4.2.2 Polovodičové relé (SSR)

Polovodičové relé funguje na venek podobně jako elektromagnetické relé. Avšak co se týče vnitřní, tak jde o zcela odlišný princip. Výhodou SSR je, že neobsahuje žádný mechanický prvek. Tedy nedochází k opotřebení a není slyšet cvakání kontaktů, na rozdíl od elektromagnetických relé. Také umožňují spínat vyšší frekvence. Mohou spínat stejnosměrné i střídavé napětí. SSR jsou řízeny stejnosměrným (od 3 V) nebo střídavým napětím. Naopak nevýhodou oproti elektromagnetickým relé je, že dochází k většímu úbytku napětí spínaného napětí a tím dochází k zahřívání. Proto je vhodné umístit SSR na chladič. Umožňují i časté přepínání mezi polohou zapnuto a vypnuto, což je často využívání u kvazispojitého řízení např. PWM. [5]

#### 4.2.3 Stykače

Využívají podobného principu jako elektromagnetická relé, avšak mají masivnější konstrukci. Oproti relé jsou však spínány vyšší proudy až tisíce ampér. Existují jednofázové i třífázové provedení. [5]



Obrázek 12 – Schéma stykače

Cívka tvaru U (1) přitahuje část jádra tvaru I (2) a tím spíná kontakt (3).

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 TOPNÉHO HNÍDO

### 5.1 Popis topného hnízda

Topné hnízdo je určeno k elektrickému ohřevu skleněných baněk, které jsou většinou kulovitěho tvaru. Vyrábí se mnoho druhů hnízd o různém výkonu pro různé objemy baněk. Hnízda jsou používány především v chemickém a potravinářském průmyslu. Existují i typy, které mají vestavěný indukční mechanismus, jenž za pomoci magnetů tyčovitěho tvaru vytváří homogenní prostředí uvnitř baňky. Ohřev je možno regulovat pomocí termostatu, který bývá nastavitelný.

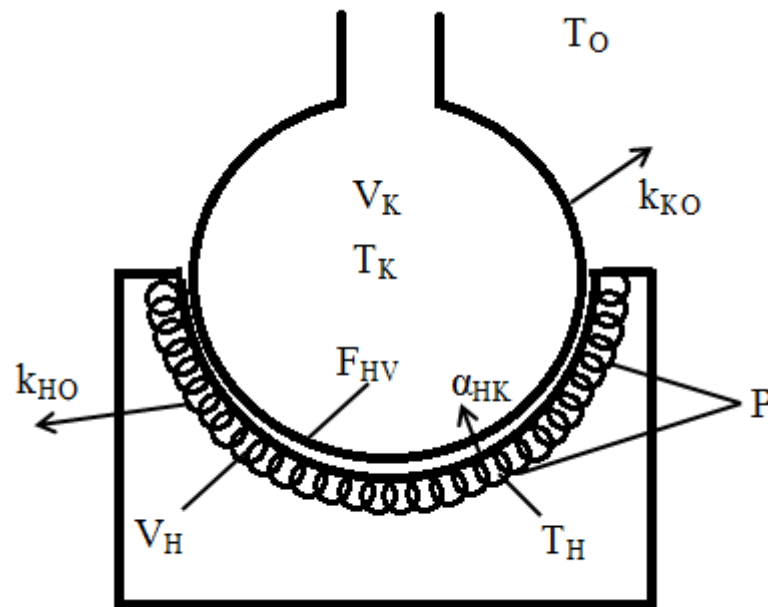


Obrázek 13 – Vizuální ukázka topného hnízda

### 5.2 Matematický popis topného hnízda

#### 5.2.1 Nákres problému

Topné hnízdo jsem rozdělil na dvě části. První částí je samotné hnízdo, kde beru v potaz především topnou spirálu, která je zdrojem tepla. Teplo následně prostupuje skrz skleněnou stěnu baňky do ohřívání kapaliny (do druhé části).



Obrázek 14 - Zjednodušený nákres topného hnízda

**Veličiny použité v obrázku 14:** $T_O$  – Okolní teplota [K] $T_H$  – Teplota topné spirály hnízda [K] $T_K$  – Teplota kapaliny [K] $V_H$  – Objem topné spirály [ $m^3$ ] $V_K$  – Objem kapaliny [ $m^3$ ] $P$  – Elektrický výkon topného hnízda [W] $F_{HK}$  – Povrch vnější části baňky, která je v kontaktu s hnízdem. [ $m^2$ ]

$k_{HO}$  – Konstanta zastupující přechod tepla z hnízda do okolí. Zahrnuje přestup tepla z topné spirály do vnitřního prostoru hnízda, akumulaci tepla ve vnitřním prostoru (zahrnuje i konstrukci a součástky) a přestup tepla z krytu hnízda do okolí. [ $W \cdot K^{-1}$ ]

$k_{KO}$  – Konstanta zastupující přechod tepla z kapaliny do okolí. Zahrnuje přestup kapaliny do okolí. Přestup je mimo jiné závislý na výšce hladiny. [ $W \cdot K^{-1}$ ]

$\alpha_{HK}$  – Přestup tepla ze spirály topného hnízda přímo do kapaliny. Může být použita pouze v případě, že výška kapaliny bude dosahovat aspoň po okraj topného hnízda, tepelná kapacita baňky bude zanedbána a i prostup tepla skrze ni. [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]

**Další veličiny, které budou dále použity:**

$\rho_H$  – Hustota materiálu topné spirály [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

$\rho_K$  – Hustota kapaliny [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

$c_{PH}$  – Měrná tepelná kapacita spirály [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

$c_{PK}$  – Měrná tepelná kapacita kapaliny [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

$m_H$  – Hmotnost topné spirály hnízda [kg]

$m_K$  – Hmotnost kapaliny [kg]

### 5.2.2 Definice veličin

Do systému vstupují dvě veličiny. Jedná se o výkon topného tělesa a o teplotu okolí, která je uvažována jako měřitelná poruchová veličina. Výstupními teplotami jsou teploty stavo-  
vé a to teplota kapaliny a pak teplota topné spirály, jenž z hlediska řízení není důležitá  
a navíc je složité ji měřit.

### 5.2.3 Zjednodušující předpoklady

- Topná spirála je brána jako kus kovu.
- Kapalina v baňce je dokonale promíchávána.
- Všechny veličiny mimo vstupních a výstupních jsou konstantní.
- Tepelná kapacita baňky je zanedbána.
- Výška hladiny kapaliny v baňce dosahuje alespoň okraje topného hnízda.

### 5.2.4 Bilance

#### 5.2.4.1 Tepelná bilance hnízda

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Teplo vzniklé} \\ \text{z topné spirály} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Teplo přestupující} \\ \text{do kapaliny} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Teplo odcházející} \\ \text{do okolí} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Akumulované} \\ \text{teplo ve spirále} \end{array} \right\}$$

$$P = F_{HK} \cdot \alpha_{HK} \cdot (T_H - T_K) + k_{HO} \cdot (T_H - T_O) + V_H \cdot \rho_H \cdot c_{pH} \cdot \frac{dT_H}{dt} \quad (43)$$

#### 5.2.4.2 Tepelná bilance baňky

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Teplo vstupující} \\ \text{z hnízda} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Teplo odcházející} \\ \text{do okolí} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Akumulované} \\ \text{teplo v kapalině} \end{array} \right\}$$

$$F_{HK} \cdot \alpha_{HK} \cdot (T_H - T_K) = k_{KO} \cdot (T_K - T_O) + V_K \cdot \rho_K \cdot c_{pK} \cdot \frac{dT_K}{dt} \quad (44)$$

Jedná se o model lineární, dynamický, stochastický (vliv okolní teploty) se soustřednými parametry.

### 5.2.5 Model ustáleného stavu

Dosazením počátečních podmínek (vstupních veličin) do modelu ustáleného stavu získáme ustálený stav výstupních veličin. Aby se dosáhlo ustáleného stavu, tak nesmí probíhat změny v systému. Tedy derivace v bilančních rovnicích budou rovny nule.

$$T_H^S = f_1(P^S, T_O^S) \quad (45)$$

$$T_K^S = f_2(P^S, T_O^S) \quad (46)$$

Pak:

$$P^S = F_{HK} \cdot \alpha_{HK} \cdot (T_H^S - T_K^S) + k_{HO} \cdot (T_H^S - T_O^S) \quad (47)$$

$$T_H^S = \frac{F_{HK} \cdot \alpha_{HK} \cdot T_K^S + k_{HO} \cdot T_O^S}{F_{HV} \cdot \alpha_{HK} + k_{HO}} \quad (48)$$

$$F_{HK} \cdot \alpha_{HK} \cdot (T_H^S - T_K^S) = k_{KO} \cdot (T_K^S - T_O^S) \quad (49)$$

$$T_K^S = \frac{F_{HV} \cdot \alpha_{HK} \cdot T_H^S + k_{KO} \cdot T_O^S}{F_{HV} \cdot \alpha_{HK} + k_{KO}} \quad (50)$$

Dále by následovalo dosazení pracovních hodnot za vstupní parametry a řešení soustavy rovnic.

### 5.2.6 Odchylkový model

Nyní nahradím časově proměnné veličiny veličinami odchylkovými. Pak budou veličiny vyjadřovány jako změny oproti pracovním hodnotám.

$$\begin{aligned} x_1 = \Delta T_H(t) = T_H(t) - T_H^S & \quad u = \Delta P(t) = P(t) - P^S \\ x_2 = \Delta T_K(t) = T_K(t) - T_K^S & \quad v = \Delta T_O(t) = T_O(t) - T_O^S \end{aligned} \quad (51)$$

$$\frac{dx_1}{dt} = -\left(\frac{F_{HK} \cdot \alpha_{HK} + k_{HO}}{V_H \cdot \rho_H \cdot c_{pH}}\right) \cdot x_1 + \frac{F_{HK} \cdot \alpha_{HK}}{V_H \cdot \rho_H \cdot c_{pH}} \cdot x_2 + \frac{1}{V_H \cdot \rho_H \cdot c_{pH}} \cdot u + \frac{k_{HO}}{V_H \cdot \rho_H \cdot c_{pH}} \cdot v \quad (52)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{F_{HK} \cdot \alpha_{HK}}{V_K \cdot \rho_K \cdot c_{pK}} \cdot x_1 - \left(\frac{F_{HK} \cdot \alpha_{HK} + k_{KO}}{V_K \cdot \rho_K \cdot c_{pK}}\right) \cdot x_2 + \frac{k_{KO}}{V_K \cdot \rho_K \cdot c_{pK}} \cdot v \quad (53)$$

Po úpravě:

$$\frac{dx_1}{dt} = a_{11} \cdot x_1 + a_{12} \cdot x_2 + b_{11} \cdot u + b_{12} \cdot v \quad (54)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = a_{21} \cdot x_1 + a_{22} \cdot x_2 + b_{22} \cdot v \quad (55)$$

Kde:

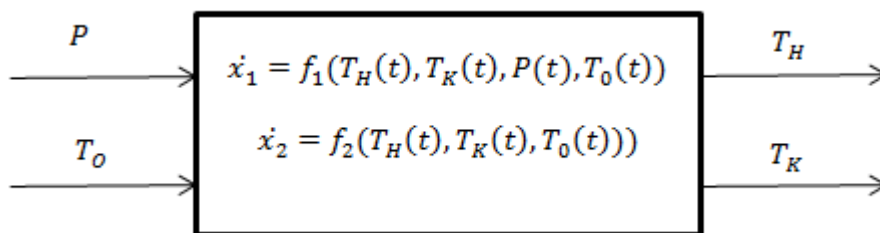
$$\begin{aligned} a_{11} &= -\left(\frac{F_{HK} \cdot \alpha_{HK} + k_{HO}}{V_H \cdot \rho_H \cdot c_{pH}}\right) & a_{12} &= \frac{F_{HK} \cdot \alpha_{HK}}{V_H \cdot \rho_H \cdot c_{pH}} \\ a_{21} &= \frac{F_{HK} \cdot \alpha_{HK}}{V_K \cdot \rho_K \cdot c_{pK}} & a_{22} &= -\left(\frac{F_{HK} \cdot \alpha_{HK} + k_{KO}}{V_K \cdot \rho_K \cdot c_{pK}}\right) \\ b_{11} &= \frac{1}{V_H \cdot \rho_H \cdot c_{pH}} & b_{12} &= \frac{k_{HO}}{V_H \cdot \rho_H \cdot c_{pH}} \\ b_{21} &= 0 & b_{22} &= \frac{k_{KO}}{V_K \cdot \rho_K \cdot c_{pK}} \end{aligned} \quad (56)$$

Jednotlivé fyzikální parametry není problém definovat, až na veličiny  $\alpha_{HK}$ ,  $k_{HO}$ ,  $k_{KO}$ . Tyto parametry je možné vypočítat za pomoci kritérií definující sdílení tepla, avšak to by mohlo být velice náročné vzhledem ke konstrukčním parametrům topného hnízda. Jednodušší řešení poskytuje identifikace parametrů přes přenosovou funkci. Tedy provede se experimentální identifikace topného hnízda, kde budou ostatní parametry jasně dány.

### 5.3 Určení přenosové funkce

#### 5.3.1 Stavový popis

Jak již bylo řečeno, systém je definován dvěma vstupy a dvěma výstupy. Jelikož výstupní veličiny jsou zároveň stavovými veličinami, tak je stav systému popsán dvěma rovnicemi. První rovnice popisující odchylku teploty topného hnízda je funkcí právě teploty hnízda, teploty kapaliny, okolní teploty a výkonu. Druhá funkce popisující odchylku teploty kapaliny závisí na stejných parametrech, avšak už není přímo závislá na výkonu hnízda.



Obrázek 15 – Náčrt veličin určující stavová popis

Jednotlivé matice a vektory stavového popisu pak budou mít rozměr:

$$\dot{x}_{2 \times 1} = A_{2 \times 2} \cdot x_{2 \times 1} + B_{2 \times 2} \cdot U_{2 \times 1} \quad (57)$$

$$y_{2 \times 1} = C_{2 \times 2} \cdot x_{2 \times 1} + D_{2 \times 2} \cdot U_{2 \times 1} \quad (58)$$

Po zavedení veličin ze vztahů (51) budou vektory a matice definovány následovně:

$$y = x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \quad u = \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad (59)$$

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u} & \frac{\partial f_1}{\partial v} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u} & \frac{\partial f_2}{\partial v} \end{pmatrix} \quad (60)$$

Vzhledem k tomu, že stavové veličiny jsou zároveň parametry výstupní tak matice C a D budou ve tvaru:

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad D = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (61)$$

Funkce  $f_1$  a  $f_2$  definují chování uvnitř systému. Jedná se o rovnice (52) a (53).

$$f_1 \equiv \frac{dx_1}{dt} = - \left( \frac{F_{HK} \cdot \alpha_{HK} + k_{HO}}{V_H \cdot \rho_H \cdot c_{pH}} \right) \cdot x_1 + \frac{F_{HK} \cdot \alpha_{HK}}{V_H \cdot \rho_H \cdot c_{pH}} \cdot x_2 + \frac{1}{V_H \cdot \rho_H \cdot c_{pH}} \cdot u + \frac{k_{HO}}{V_H \cdot \rho_H \cdot c_{pH}} \cdot v \quad (62)$$

$$f_2 \equiv \frac{dx_2}{dt} = \frac{F_{HK} \cdot \alpha_{HK}}{V_K \cdot \rho_K \cdot c_{pK}} \cdot x_1 - \left( \frac{F_{HK} \cdot \alpha_{HK} + k_{KO}}{V_K \cdot \rho_K \cdot c_{pK}} \right) \cdot x_2 + \frac{k_{KO}}{V_K \cdot \rho_K \cdot c_{pK}} \cdot v \quad (63)$$

Jednotlivé prvky matice A a B:

$$\begin{aligned} a_{11} &= - \left( \frac{F_{HK} \cdot \alpha_{HK} + k_{HO}}{V_H \cdot \rho_H \cdot c_{pH}} \right) & a_{12} &= \frac{F_{HK} \cdot \alpha_{HK}}{V_H \cdot \rho_H \cdot c_{pH}} \\ a_{21} &= \frac{F_{HK} \cdot \alpha_{HK}}{V_K \cdot \rho_K \cdot c_{pK}} & a_{22} &= - \left( \frac{F_{HK} \cdot \alpha_{HK} + k_{KO}}{V_K \cdot \rho_K \cdot c_{pK}} \right) \\ b_{11} &= \frac{1}{V_H \cdot \rho_H \cdot c_{pH}} & b_{12} &= \frac{k_{HO}}{V_H \cdot \rho_H \cdot c_{pH}} \\ b_{21} &= 0 & b_{22} &= \frac{k_{KO}}{V_K \cdot \rho_K \cdot c_{pK}} \end{aligned} \quad (64)$$

### 5.3.2 Přenosová funkce

Po odvození stavového popisu na vstupně výstupní je výpočet přenosu stanoven takto:

$$G_S = C \cdot (sI - A)^{-1} \cdot B + D \quad (65)$$

Po dosazení:

$$G_S = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} s - a_{11} & -a_{12} \\ -a_{21} & s - a_{22} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ 0 & b_{22} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (66)$$

$$\begin{pmatrix} s - a_{11} & -a_{12} \\ -a_{21} & s - a_{22} \end{pmatrix}^{-1} = \frac{1}{s^2 - (a_{11} + a_{22})s + a_{11} \cdot a_{22} - a_{21} \cdot a_{12}} \cdot \begin{pmatrix} s - a_{22} & a_{12} \\ a_{21} & s - a_{11} \end{pmatrix}$$

Pro zjednodušení zápisu zavedu substituci:

$$s^2 - (a_{11} + a_{22})s + a_{11} \cdot a_{22} - a_{21} \cdot a_{12} = d \quad (67)$$

Pak:

$$G_S = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{s - a_{22}}{d} & \frac{a_{12}}{d} \\ \frac{a_{21}}{d} & \frac{s - a_{11}}{d} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ 0 & b_{22} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (68)$$

Výsledný přenos je dán maticí o rozměru  $2 \times 2$ :

$$G_S = \begin{pmatrix} \frac{(s - a_{22}) \cdot b_{11}}{d} & \frac{a_{12} \cdot b_{22} + (s - a_{22}) \cdot b_{12}}{d} \\ \frac{a_{21} \cdot b_{11}}{d} & \frac{a_{21} \cdot b_{22} + (s - a_{11}) \cdot b_{22}}{d} \end{pmatrix} \quad (69)$$

Celkový přenos udává vztahy mezi vstupy a oběma výstupy. Z hledisky řízení je však důležitý přenos pro stavovou veličinu  $x_2$  ( $\Delta T_K$ ).

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{(s - a_{22}) \cdot b_{11}}{d} & \frac{a_{12} \cdot b_{22} + (s - a_{22}) \cdot b_{12}}{d} \\ \frac{a_{21} \cdot b_{11}}{d} & \frac{a_{21} \cdot b_{22} + (s - a_{11}) \cdot b_{22}}{d} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad (70)$$

Tedy:

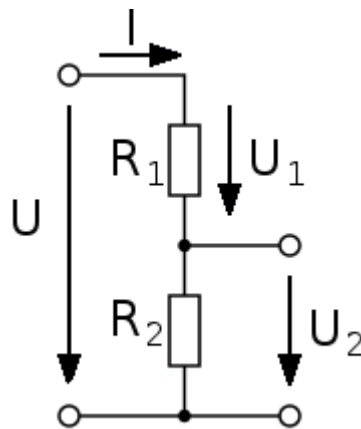
$$x_2 = \left( \frac{a_{21} \cdot b_{11}}{d} \quad \frac{a_{21} \cdot b_{22} + (s - a_{11}) \cdot b_{22}}{d} \right) \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad (71)$$

$$G_{STK} = \left( \frac{a_{21} \cdot b_{11}}{d} \quad \frac{a_{21} \cdot b_{22} + (s - a_{11}) \cdot b_{22}}{d} \right) \quad (72)$$

Kde přenos poruchové veličiny pro účely návrhu řízení může být zanedbán, protože na celkový výstup nemá velký vliv (ke změně okolní teploty téměř nedochází). Určení parametrů  $\alpha_{HK}$ ,  $k_{HO}$ ,  $k_{KO}$  by se následně provádělo porovnáním experimentálně získaného přenosu a prvního přenosu ze vztahu (72), samozřejmě po dosazení ostatních parametrů.

## 6 EXPERIMENTÁLNÍ IDENTIFIKACE

Vzhledem k neurčitosti parametrů  $\alpha_{HK}, k_{HO}, k_{KO}$  v matematické modelu jsem provedl experimentální identifikaci vybraných topných hnízd. Pro měření byla použita měřicí karta MF624 od firmy Humusoft, která je vybavena A/D převodníky, zdrojem napětí 5V a zemí. Teplota byla měřena prostřednictvím odporového platinového senzoru PT1000, který byl zapojen do druhé větve napěťového děliče. Na první větvi byl umístěn rezistor o hodnotě odporu  $1200\Omega$ .



Obrázek 16 – Napěťový dělič  
použitý pro měření

Na místo rezistoru  $R_2$  je umístěn platinový senzor. Podle obrázku 16 je požadované napětí  $U_2$  vyjádřeno následovně:

$$U_2 = \frac{U \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (73)$$

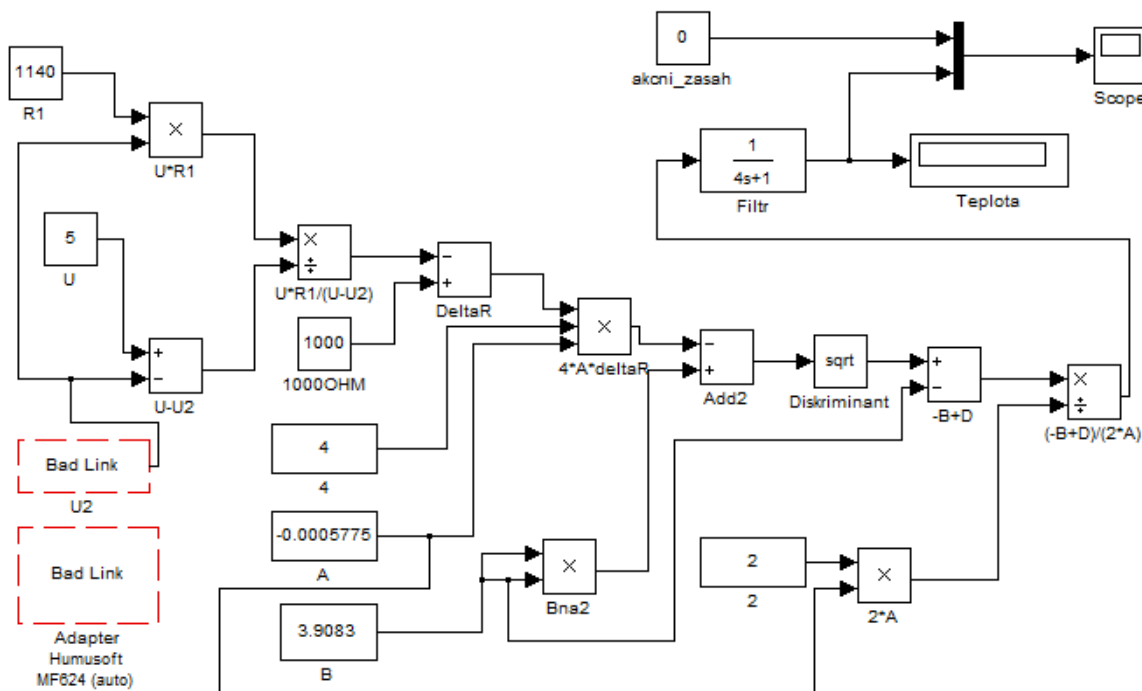
Po úpravě dostaneme vztah pro výpočet odporu senzoru PT1000:

$$R_2 = \frac{U_2 \cdot R_1}{U - U_2} \quad (74)$$

Poté dle charakteristiky senzoru PT1000 se provede výpočet teploty:

$$R = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (75)$$

Kde  $A = 3.9083 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $B = -5.775 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$ ,  $R$  je odpor senzoru a  $R_0$  je odpor senzoru při  $0^\circ\text{C}$ .



Obrázek 17 – Schéma pro výpočet teploty v programu Simulink

Bloky v obrázku 17, které mají ve středu nápis „Bad Link“ odpovídají bloku AD převodníku a bloku karty MF624. Kvůli zašuměnému vstupnímu signálu je aplikován filtr 1. řádu.

## 6.1 Experimentální identifikace topného hnízda

Proběhlo celkově mnoho experimentálních měření. Do práce však uvedu pouze ta, která budou dále použita nebo byla nějakým způsobem zajímavá. Pro srovnání jsem používal dvě odlišné kapaliny – voda a propylenglykol, aby bylo dosaženo parametrické neurčitosti. Identifikaci jsem prováděl za pomoci funkce *fminsearch*.

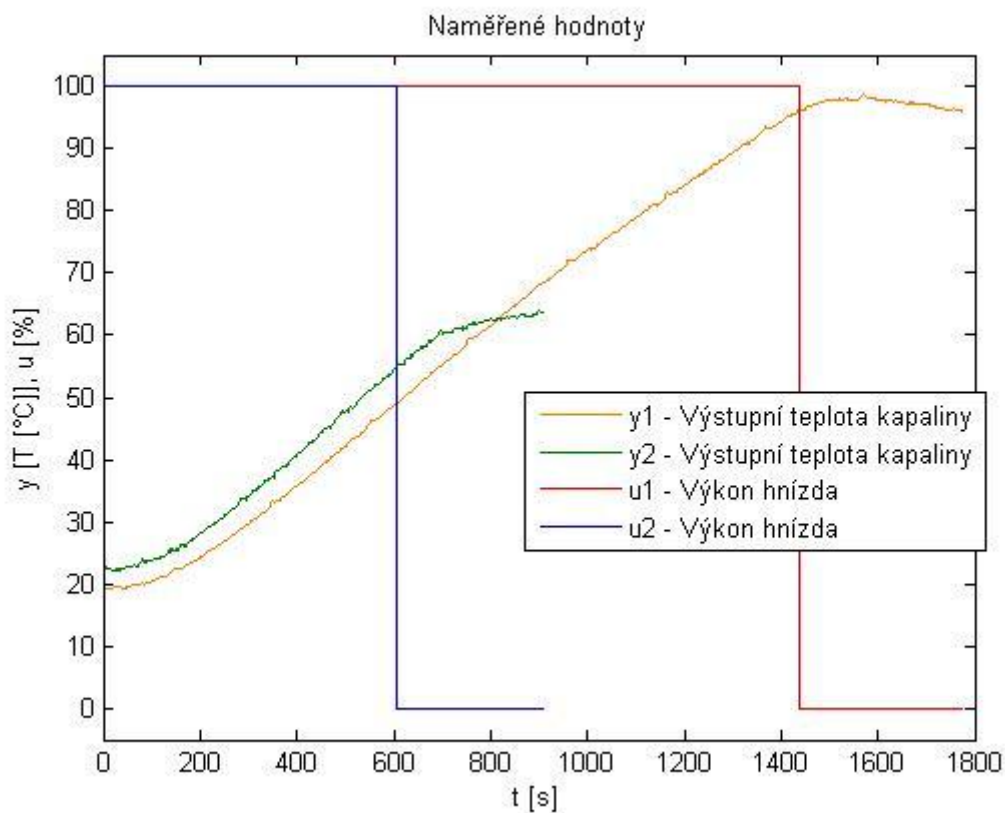
Tabulka 1 – Porovnání vybraných fyzikálních parametrů vody a propylenglykolu

|  | Voda | Propylenglykol |
|--|------|----------------|
| Bod varu [°C]                                    | 100  | 187,6          |
| $\rho_{20}$ [kg·m <sup>-3</sup> ]                | 997  | 1036           |
| $c_{p20}$ [J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ] | 4180 | 2480           |

### 6.1.1 Identifikace topného hnízda o výkonu 150W

#### 6.1.1.1 Voda 280ml

Zde uvedu dvě měření při podobných fyzikálních parametrech (Objem ohříváné vody je stejný nebo alespoň podobný). Protože voda dosahuje bodu varu při sto stupních, tak nemohla být naměřena přechodová charakteristika přivedením 100% akčního zásahu po celý přechodový děj. Mimochodem totéž platí i u propylenglykolu, kde však bod varu dosahuje vyšších hodnot.



Obrázek 18 – Ukázka dvou měření, objem vody se shodoval.

#### Komentář k obrázku 18:

Podle průběhu teplot je patrné, že se jedná o systém druhého řádu, což odpovídá přenosu získaného z matematického modelu. Doby průtahů u obou měření jsou velice podobné. V dalším průběhu (až po dobu, kdy výkon hnízda  $u$  měření dva je maximální) se rychlosti ohřevů mírně liší. Může to být způsobeno odlišným objemem ohříváných kapalin nebo i chybou měření. K ochlazování dochází u prvního měření rychleji, protože rozdíl okolní teploty a teploty kapaliny je vyšší než u druhého měření.

#### Získané přenosy:

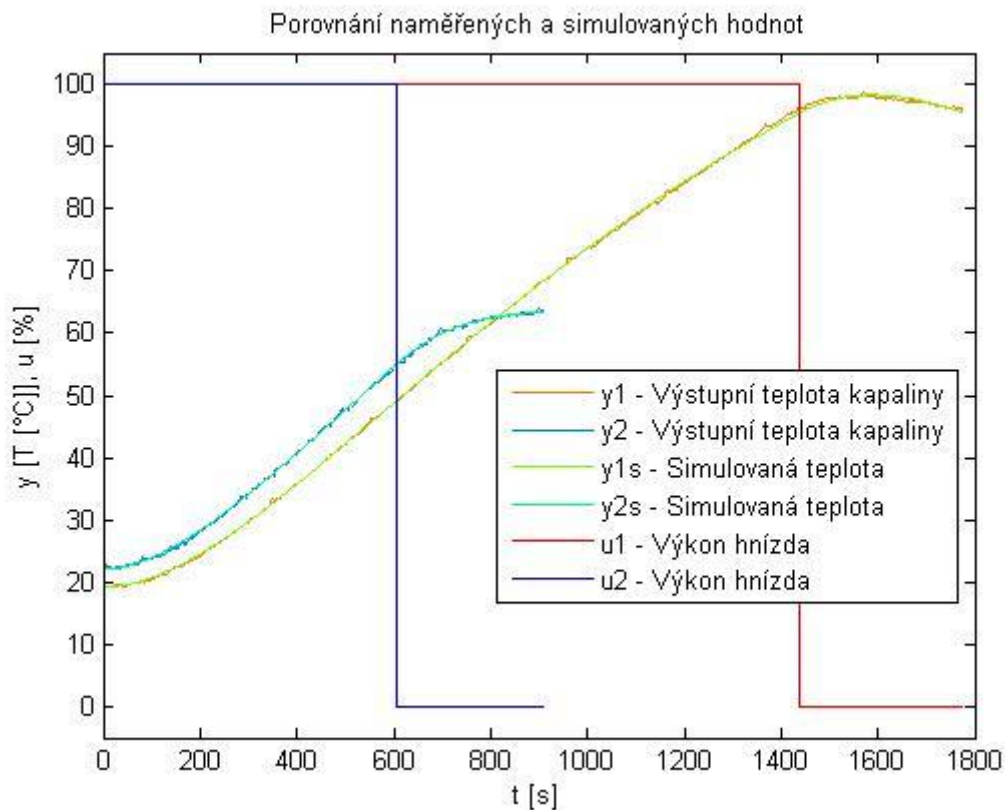
Přenos získaný z prvního měření:

$$G_s = \frac{1.316}{3.853 \cdot 10^5 s^2 + 1577s + 1}$$

Přenos získaný z druhého měření:

$$G_s = \frac{1.939}{4.561 \cdot 10^5 s^2 + 2360s + 1}$$

Rozdíly mezi přenosy jsou především způsobeny rozdílem okolní teploty a teploty kapaliny. Tedy čím menší rozdíl teplot tím je doba než dojde k ochlazení větší. Musí se brát také v úvahu tepelná kapacita hnízda, která celý proces chlazení značně zpomaluje.

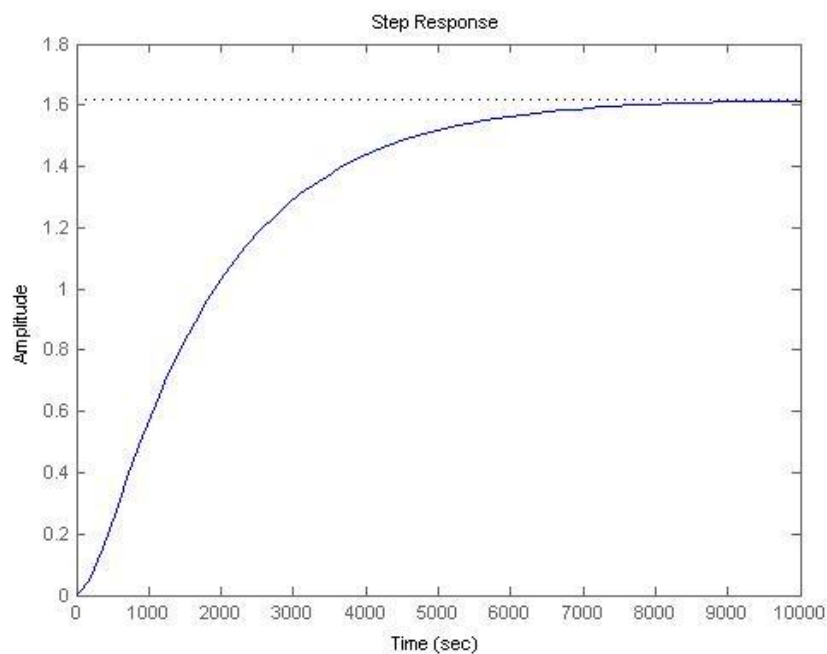


Obrázek 19 – Porovnání naměřených hodnot a simulovaných hodnot získaných z identifikovaných přenosů

Za účelem zisku optimálnějšího přenosu, provedu průměr obou získaných přenosů.

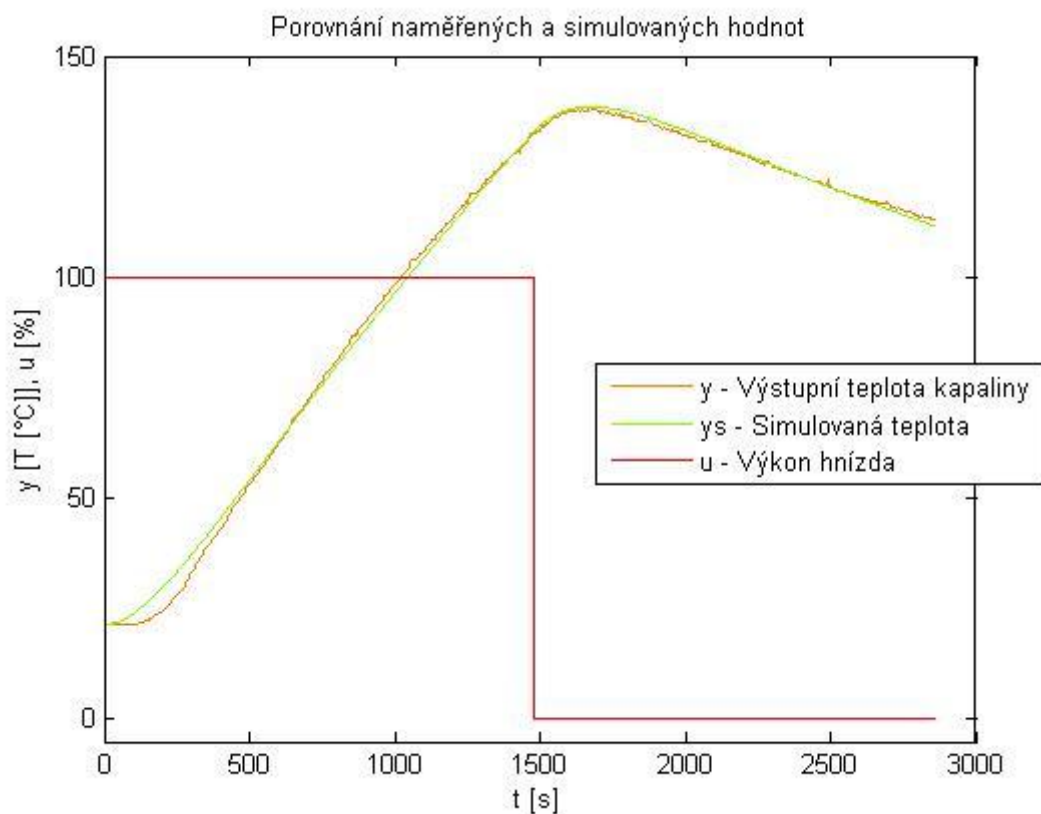
**Průměrovaný přenos:**

$$G_s = \frac{1.621}{4.19 \cdot 10^5 s^2 + 1959s + 1} = \frac{1.621}{(1714.5s + 1) \cdot (244.5s + 1)}$$



Obrázek 20 – Přejchodová charakteristika průměrovaného přenosu

### 6.1.1.2 Propylenglykol 280ml



Obrázek 21 - Porovnání naměřených hodnot a simulovaných hodnot

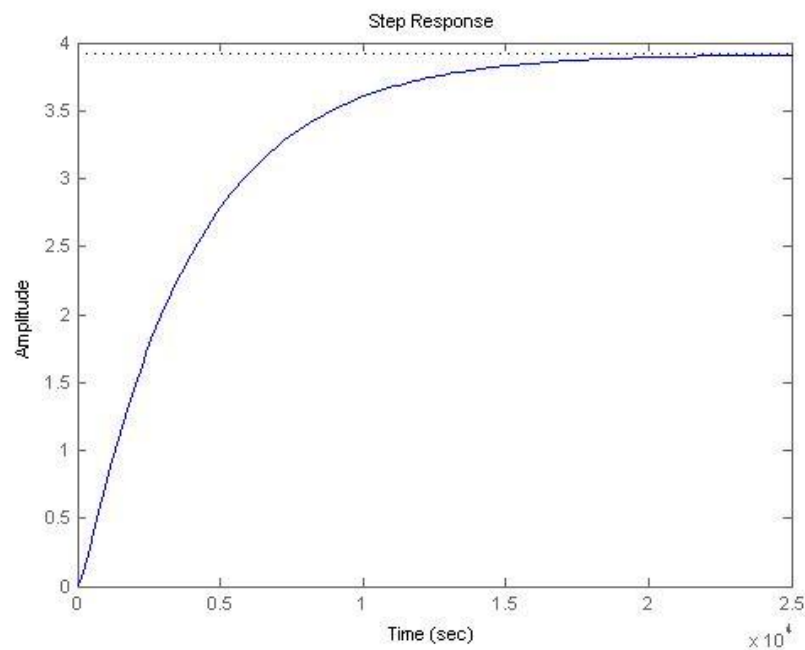
Vzhledem k tomu, že propylenglykol má bod varu o dost vyšší než bod varu vody, bude přechodový děj probíhat do vyšších teplot.

### Komentář k obrázku 21:

Naměřené a simulované teploty jsou si dosti podobné až na počátek, kde naměřená teplota je mírně opožděna a reaguje na topení až po určité době. Tento jev mohl být způsoben nezahřátým topným hnízdem. Tím pádem je velmi složité nebo dokonce nemožné aproximovat tento průběh soustavou druhého řádu, protože řád soustavy se díky zpoždění zvýší.

### Výsledný přenos:

$$G_s = \frac{3.916}{6.355 \cdot 10^5 s^2 + 4055s + 1} = \frac{3.916}{(3918s + 1) \cdot (161.4s + 1)}$$

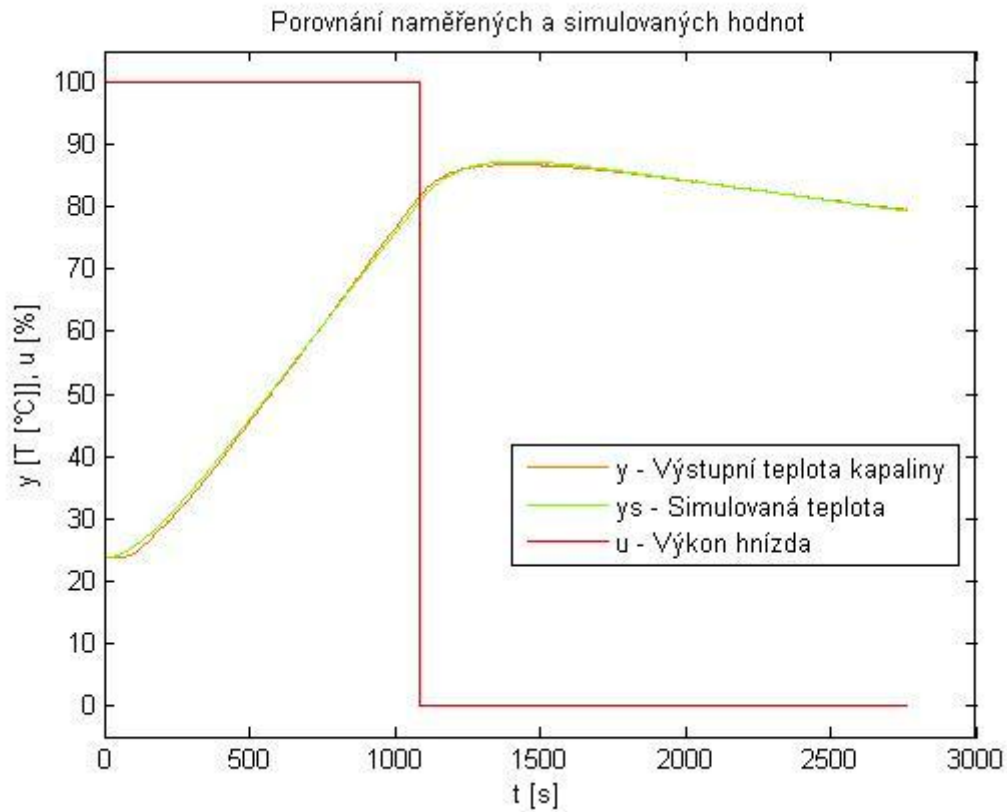


Obrázek 22 – Přechodová charakteristika získaného přenosu

## 6.1.2 Identifikace topného hnízda o výkonu 480W

### 6.1.2.1 Voda 1500ml

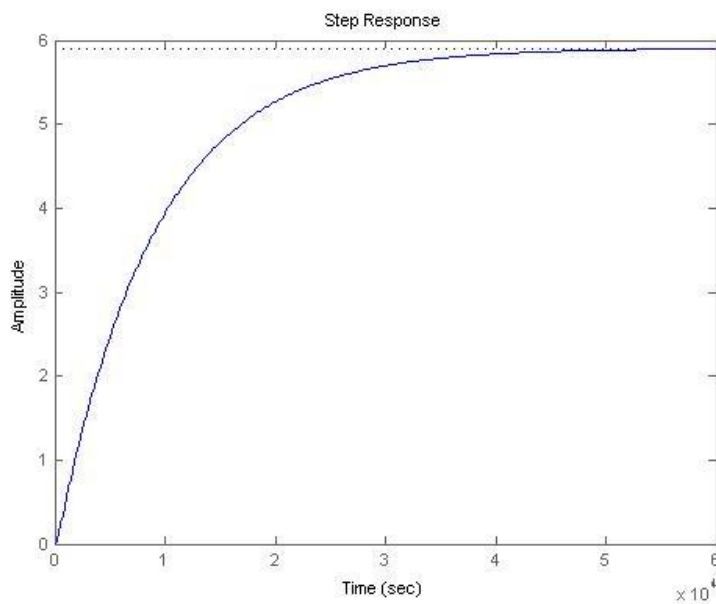
Nyní bude měření provedeno na hnízdě o větším výkonu. Také roste rozměr baňky dovnitř vkládané, čili se zvýší i objem ohřívané kapaliny.



Obrázek 23 - Porovnání naměřených hodnot a simulovaných hodnot

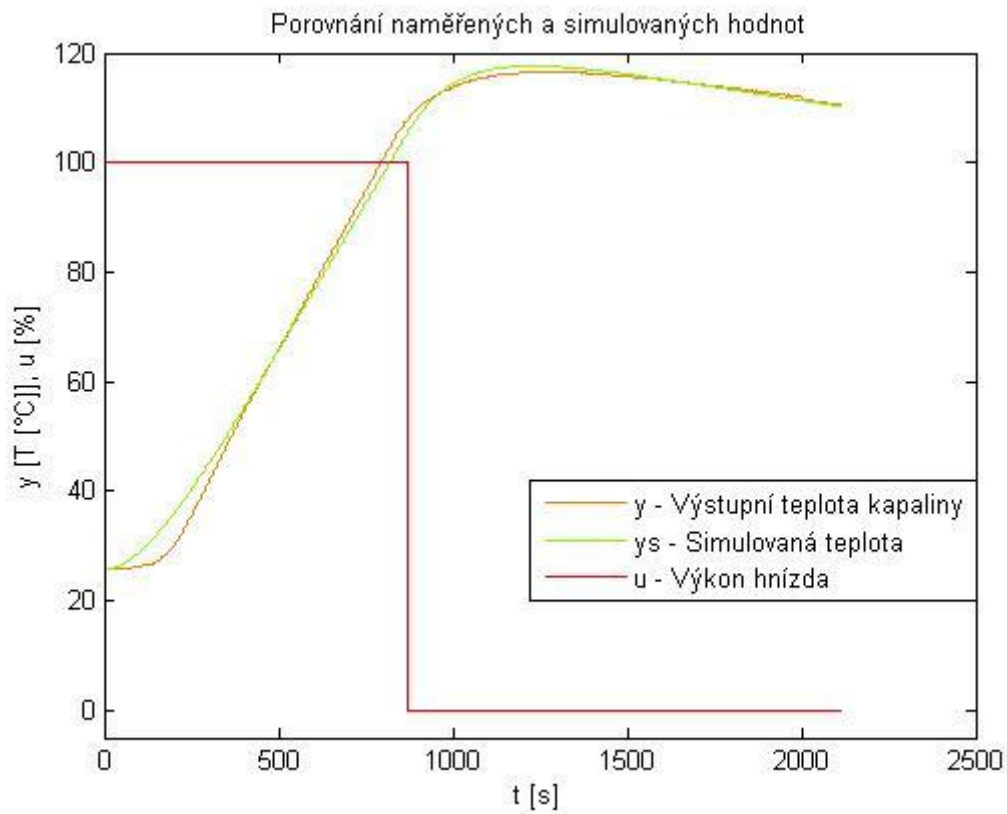
**Získaný přenos:**

$$G_s = \frac{5.904}{1.506 \cdot 10^6 s^2 + 9081s + 1} = \frac{5.904}{(8912s + 1) \cdot (168.9s + 1)}$$



Obrázek 24 - Přejchodová charakteristika získaného přenosu

## 6.1.2.2 Propylenglykol 1000ml



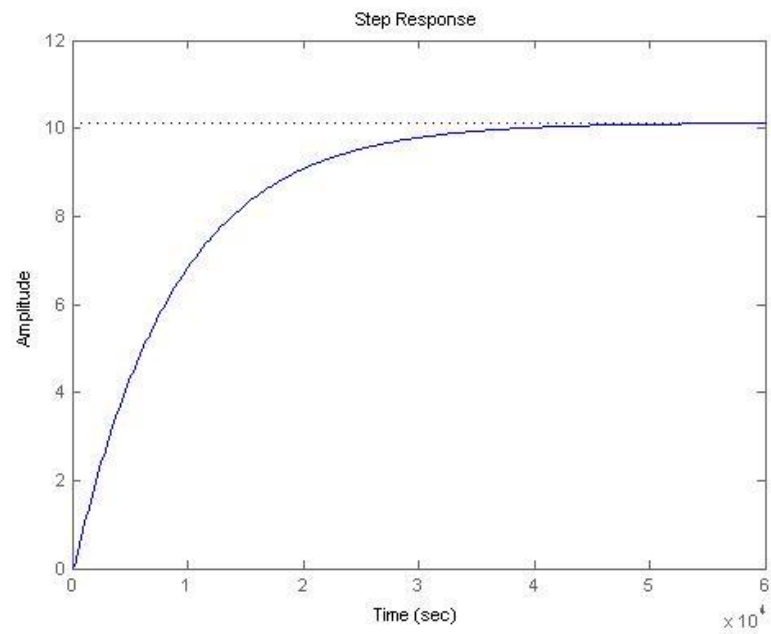
Obrázek 25 - Porovnání naměřených hodnot a simulovaných hodnot

**Komentář k obrázku 25:**

Zde se objevuje stejný problém jako v případě propylenglykolu u hnízda o výkonu 150W. Tedy hnízdo není zahřáté, což má za příčinu dopravní zpoždění.

**Získaný přenos:**

$$G_s = \frac{10.12}{1.315 \cdot 10^6 s^2 + 8905s + 1} = \frac{10.12}{(8755s + 1) \cdot (150s + 1)}$$



Obrázek 26 - Přechodová charakteristika získaného přenosu

## 7 POPIS HARDWARU

Návrh schémat byl vytvořen v programu Eagle. Schémata zapojení a osazovací plány jednotlivých součástí jsou umístěny v přílohách. Přesné názvy a typy použitých součástí jsou uvedeny v tabulce umístěné v přílohách. Zapojení, které je použito, vychází z dokumentací jednotlivých součástí.



Obrázek 27 – Pohled na víko zařízení

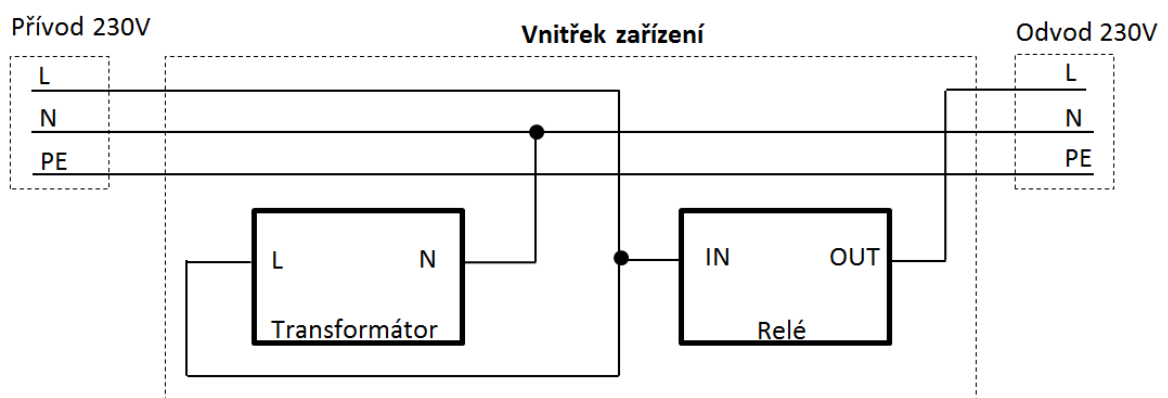
### 7.1 Napájení

Celé zařízení je napájeno 230V. Fáze je vedena na vstupní stranu svorky hlavního vypínače. Fáze je pak z výstupní strany svorky propojena se vstupní svorkou polovodičového relé a s elektrickým transformátorem. Na výstup z relé je pak přiveden fázový vodič výstupní napájení sloužící pro připojený topného zařízení. Střední vodič N je veden do transformátoru a také je propojen s N vodičem výstupního napájení. Bezpečnostní zemnicí vodič PE

je propojen pouze s bezpečnostním vodičem výstupním napájením. Toto zapojení ve schématech není obsaženo.

Použitý transformátor poskytuje výstupní střídavé napětí o hodnotě 9V. Maximální odebraný proud činí přibližně 1,1A. Střídavé napětí je posléze převedeno na stejnosměrné prostřednictvím diodového usměrňovače. Napětí je následně stabilizováno na hodnotu 5V. Veškeré používané součástky pracují právě s tímto napětím.

Celý výrobek je dimenzován vzhledem k použitým kabelům a použité svorky na vypínači na maximální proudovou zátěž 10A.



Obrázek 28 – Schéma silové části zařízení

## 7.2 CPU

Výběr vhodné řídicí jednotky byl ovlivněn především potřebnými periferiemi pro správnou funkčnost regulačního zařízení. Vybral jsem procesor MC9S08AC128 od firmy *Freescale* patřící do rodiny mikroprocesorů HCS08.

### Parametry řídicí jednotky:

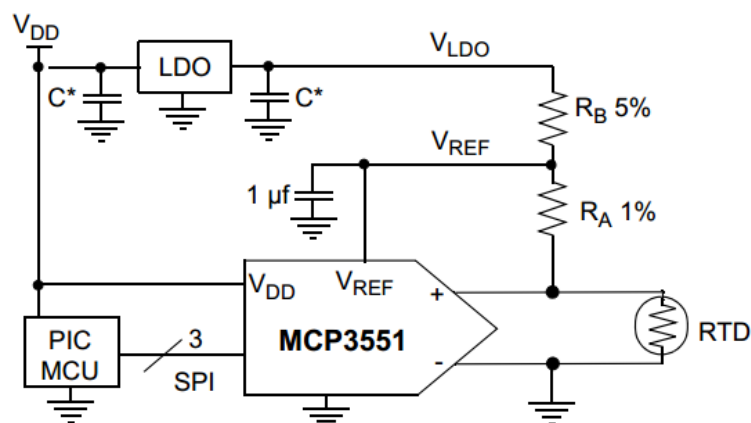
- Frekvence procesoru je 40 MHz.
- Frekvence vnitřní sběrnice dosahuje až 20MHz.
- Obsahuje MMU (Memory management unit), které umožňuje stránkování paměti.
- Disponuje až 128Kb FLASH paměti (jedná se o celkovou paměť mikroprocesoru).
- Velikost operační paměť může být až 8Kb.
- Obsahuje interní krystal, avšak může se připojit externí krystal nebo oscilátor pro přesnější funkce periferií.
- Šestnácti kanálový A/D převodník s rozlišením deseti bitů.

- Sériové komunikační rozhraní SCI.
- Sériové periferní rozhraní SPI.
- Jeden dvou kanálový a dva šesti kanálové šestnáctibitové časovače (TPM) podporující generování PWM modulace.
- Podporuje přerušení od klávesnice.

Jedná se o typ se 44 vývody, ale ne všechny jsou použitelné (některé slouží k napájení jednotky a interních periférií nebo vývody sloužící pro připojení programátoru atd.). Celá jednotka je zapouzdřena do pouzdra typu LQFP. [11]

### 7.3 AD převodník

Analogově-digitální Převodník vyráběn firmou *Microchip Technology* je určen pro aplikace měření (teploty, tlaku atd.), kdy snímá velikost napětí. Je charakterizován nízkým vnitřním šumem a vysokým rozlišením převodu. Značně zjednodušuje návrh procesu měření teploty. Komunikace s řídicí jednotkou probíhá za pomoci sériové komunikace (SPI).



Obrázek 29 – Zapojení AD převodníku pro aplikaci měření teploty

Převodník je napájen 5V. Pro správné měření teploty je však zapotřebí napětí disponující nízkým šumem. Proto je použit speciální stabilizátor napětí s příslušnými C filtry, který odpovídá právě těmto požadavkům a je přiveden přes rezistor na napětíovou referenci převodníku (dle typu aplikace). Stabilizované napětí v mém případě dosahuje 3.3V. Samotné měření odporového snímače je založeno na principu napětíového děliče, kdy změna odporu zapříčiní změnu napětí na příslušné větvi. Rezistor použitý bezprostředně před měřící větví by měl být charakterizován přesností maximálně 1%, jinak výsledek měření nemusí být přesný a bude se muset provádět kalibrace. Převodník pak posílá po sériové lince

dvaadvaceti bitový kód, z kterého se snadno vypočítá odpor připojeného snímače následujícím způsobem:

$$R_{RTD} = R_A \left( \frac{kód}{2^{n-1} - kód} \right) \tag{76}$$

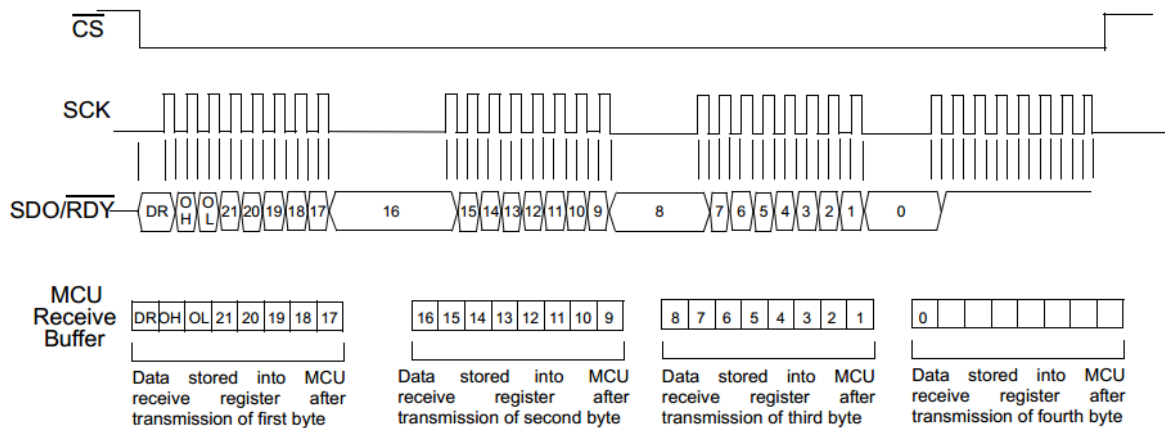
Kde  $R_{RTD}$  je odpor snímače,  $R_A$  je odpor rezistoru použitého bezprostředně před měřicí větví,  $kód$  představuje přijaté data od převodníku a  $n$  je rozlišení převodníku (v tomto případě 22 bitů).

Proud procházející přes napěťový dělič (i přes odporový senzor) při 0°C je vyjádřen podle principu napěťového děliče tedy:

$$I = \frac{U}{R_A + R_B + R_{RTD}} = \frac{3.3}{6800 + 6800 + 1000} = 226\mu A$$

Konkrétní výpočet proudu odpovídá použitému zapojení.  $R_B$  reprezentuje odpor rezistoru v první větvi napěťového děliče (viz. Obrázek 29).

Samotná komunikace mezi převodníkem a procesorem pak probíhá následovně:



Obrázek 30 – Komunikace převodníku po lince SPI

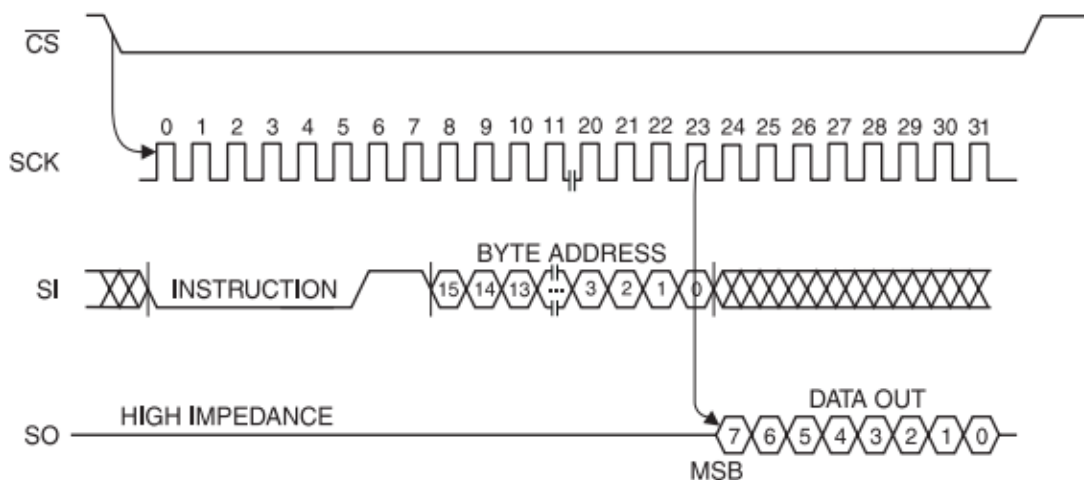
Převodník celkově odesílá data o velikosti 25 bitů, kde 22 posledních bitů představuje právě kód reprezentující napětí. První bit indikuje, zdali jsou data připravena k odeslání, pokud ano bude hodnota tohoto bitu nulová. Další dva bity reprezentují přesah referenčního napětí. Pro vyslání dat není za potřebí žádné instrukce, stačí pouze vybrat zařízení (dle pravidel SPI komunikace) a vygenerovat potřebný počet hodinových pulsů. [12, 15]

Zapojení odporového snímače (PT1000) je provedeno prostřednictvím čtyř vodičů, tedy je kompenzován odpor vedení. Avšak na kompenzaci by postačily pouze tři vodiče.

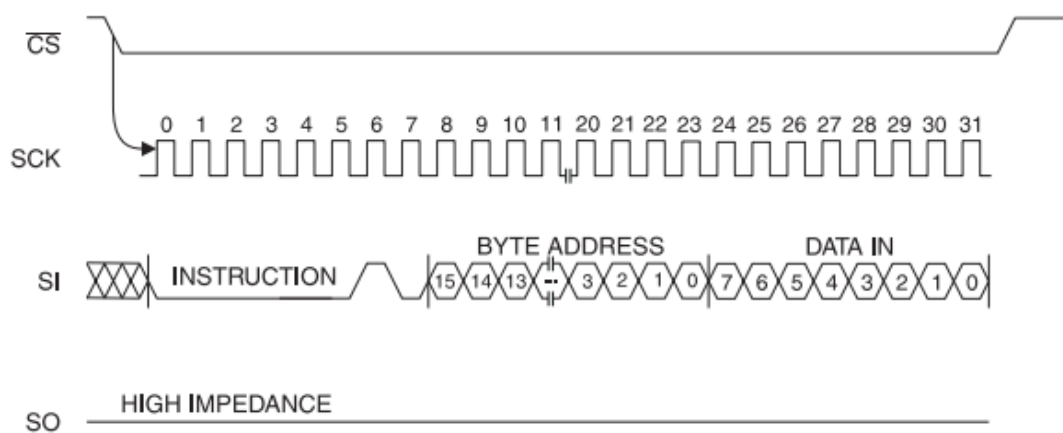
## 7.4 Paměť EEPROM

32KB paměť od firmy *ATMEL* je v zařízení využívána pro ukládání nastavení související s regulací. Komunikace s řídicí jednotkou probíhá prostřednictvím sériové komunikace (SPI). Paměť reaguje na instrukce, které jí zasílá řídicí jednotka. Každé instrukci je přiřazena příslušná akce, kterou paměť vykoná (instrukce WRITE, READ).

Paměť obsahuje *status registr*, který uchovává informace o stavu zařízení (například povolení zápisu). Pro každý další zápis se musí povolit zápis a po zapsání se zase zápis zakáže. Co se týče čtení dat, tak se paměti musí odeslat příslušná instrukce a navíc adresa buňky, z které je potřeba číst a paměť odešle byte uložený v odpovídající buňce. Pro zápis se používá identický princip, ale po zadání adresy paměť čeká na byte, který má uložit na příslušnou pozici. Paměť vždy nějakou dobu data zpracovává (viz. dokumentace), proto je vhodné mezi adresu a příchozí (odchozí) data z řídicí jednotky vložit malé časové zpoždění. Adresa je definována dvěma byte (vyšší a nižší byte adresy). [13]



Obrázek 31 – Průběh komunikace při čtení



Obrázek 32 – Průběh komunikace při zápisu

## 7.5 RS 232

V mém případě je použita asynchronní komunikace, tedy vysílací zařízení pošle definovaná data po datovém vodiči a po přijetí dat na přijímači se zařízení synchronizují. Každý byte začíná takzvaným *start bitem* a je zakončen *stop bitem*. Komunikace probíhá pouze na dvou vodičích.

Jako budič a přijímač sériové linky jsem použil zařízení od firmy *MAXIM*. Zařízení je určeno pro napájení 5V.

## 7.6 SSR Relé

Jedná se o výrobek firmy *Carlo Gavazzi*. Relé je použito jako spínání napájení topného hnízda. Jedná se o relé, které řídí střídavé napětí o hodnotě 230V a je řízeno stejnosměrným napětím v rozmezí 3-32V. Je vybaveno vestavěným varistorem. Maximální proudová zátěž činí 25A. Samotnému spínání (rozpínání) dochází v okamžiku, kdy řízené střídavé napětí protne nulovou hranici napětí. Při použití střídavého napětí o frekvenci 50Hz bude sepnutí (rozepnutí) trvat 10ms. [14]

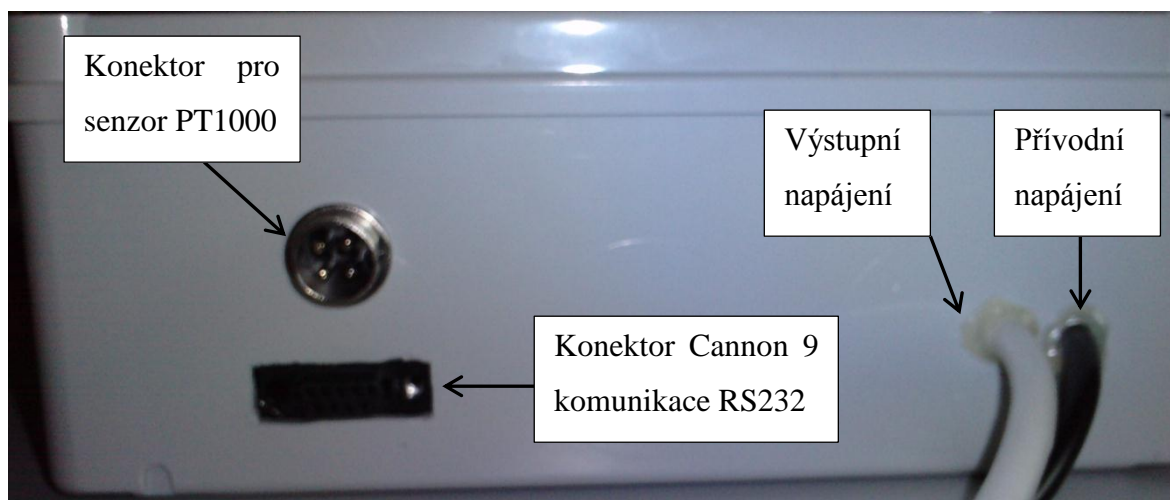
V případě zkratu za výstupem z relé dojde k proudové špičce, která může relé poškodit. Pokud se pracuje v prostředí, kde by mohlo ke zkratu dojít, tak by měla být použita rychlá pojistka na ochranu polovodičů umístěná mezi vstup relé a přívodem napětí.

## 7.7 Ostatní součástky

Pro zobrazování hodnot a orientaci pozice v menu je použit znakový displej od firmy *Data Image CO*. Displej dokáže zobrazovat celkově 32 znaků ve dvou řádcích. Je vybaven zele-

nožlutým podsvícení. Komunikace mezi řídicí jednotkou probíhá po čtyřech vodičích, tedy byte se posílá nadvakrát (nejdřív vrchní půlka bytu posléze spodní). Komunikace jinak může probíhat po osmi vodičích, ale to však vede k plýtvání vývodů řídicí jednotky.

Ve výrobku jsou použity další součástky, které není nutné nějak více rozepisovat. Jedná se o tlačítka, diody, konektory, dutinkové lišty, piezoelektrický buzzer, pojistky a pasivní součástky atd.



Obrázek 33 – Boční pohled na zařízení

Co se týče připojení kabelu s PT1000 na konektor, tak na levé dva kolíky od zámku konektoru se přivádí první vývod senzoru a na pravé kolíky od zámku se přivádí druhý vývod senzoru.

## 8 PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ

Program byl vyvíjen v programu *CodeWarrior*.

Hlavní smyčka programu obsahuje pouze inicializační funkce a proměnné. Hlavní část programu je pak umístěna v přerušení od časovače, které se provádí periodicky po 100ms. Jelikož však výpočty spojené s adaptivními regulátory jsou velice náročné, co se týče procesorového času, tak se před výpočtem adaptivního regulátoru periodické přerušování s periodou 100ms vypne a následně se pustí časovač s periodickým přerušování 500ms. Po prvním přerušení od časovače s periodou 500ms, se tento časovač zase vypne a pustí časovač s periodickým přerušování 100ms. Celková doba procesu přepínání je 600ms, kterou samozřejmě beru v úvahu.

Některé používané knihovny jsou vytvořené prostřednictvím nástroje *Procesor Expert* vyvíjený firmou *Freescale*. Jedná se o knihovny související se stiskem tlačítek, s řízením přerušování od tlačítka (pouze tlačítko STOP), s řízením přerušování od časovačů, s komunikací po sériové lince, s PWM modulací, která je řízena také časovači. Veškeré tyto knihovny nastavují registry procesoru a poskytují příslušné funkce, které zjednodušují nastavování a programování řídicí jednotky. Zbylé knihovny jsou mé vlastní. Jsou to knihovny zabývající se SPI komunikací, počítáním matic, zobrazováním příslušných znaků na displeji, definováním vlastních znaků zobrazovaných na displeji. Dále jsou vytvořeny dvě hlavní knihovny. Knihovna *menu* poskytuje uživateli nastavovat důležité parametry potřebné k regulaci nebo k měření. Knihovna *regulator* umožňuje výběr nastavených parametrů a následně řídí celý proces regulace nebo měření dle vybraných parametrů.

Zařízení je vybavenou dvěma adaptivními a jedním klasickým regulátorem. Jedná se o adaptivní verzi silné metody konečného počtu kroků, adaptivní verzi metody přiřazení pólů a regulátorem navržený metodou požadovaného modelu.

### 8.1 Informace k nastavování regulátorů

Adaptivní regulátory vyžadují k regulaci počáteční odhady parametrů pro danou periodu vzorkování, periodu vzorkování a hodnoty kovarianční matice  $C$ . Pro jednoduchost se zadává pouze jediný parametr  $C$ , kterým se vyplní hlavní diagonála kovarianční matice  $C$ . Matice  $C$  na počátku regulace určuje v průběžné identifikaci věrohodnost odhadu parametrů. Pokud je řízená soustava (topné hnízdo) identifikována správně, tak je vhodné volit parametr  $C$  malý (řádově desetiny, setiny, tisíciny), protože průběžná identifikace při vy-

soké hodnotě parametru  $C$  může odhady parametrů v důsledku šumu výrazně změnit, pak by regulační pochod nemusel pracovat dle požadavků. Naopak, pokud parametry soustavy nejsou přesné pro danou soustavu, tak je vhodné parametr  $C$  volit větší, pak by se měl adaptační mechanismus přizpůsobit daným podmínkám. U adaptivní verze metody přiřazení se navíc volí parametr  $\alpha$ , který udává rychlost regulačního pochodu. Volí se v intervalu 0-1 a čím více se blíží k nule, tím je regulační pochod rychlejší. Odhady parametrů jsou získávány z diskretního přenosu.

$$G(z^{-1}) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}; T_0 \quad (77)$$

Regulátor nastavován metodou inverze dynamiky vyžaduje pro regulaci parametry  $q_0, q_1, q_2$  a periodu vzorkování pro kterou jsou parametry vypočtené. Regulátor v diskretním stavu je pak dán:

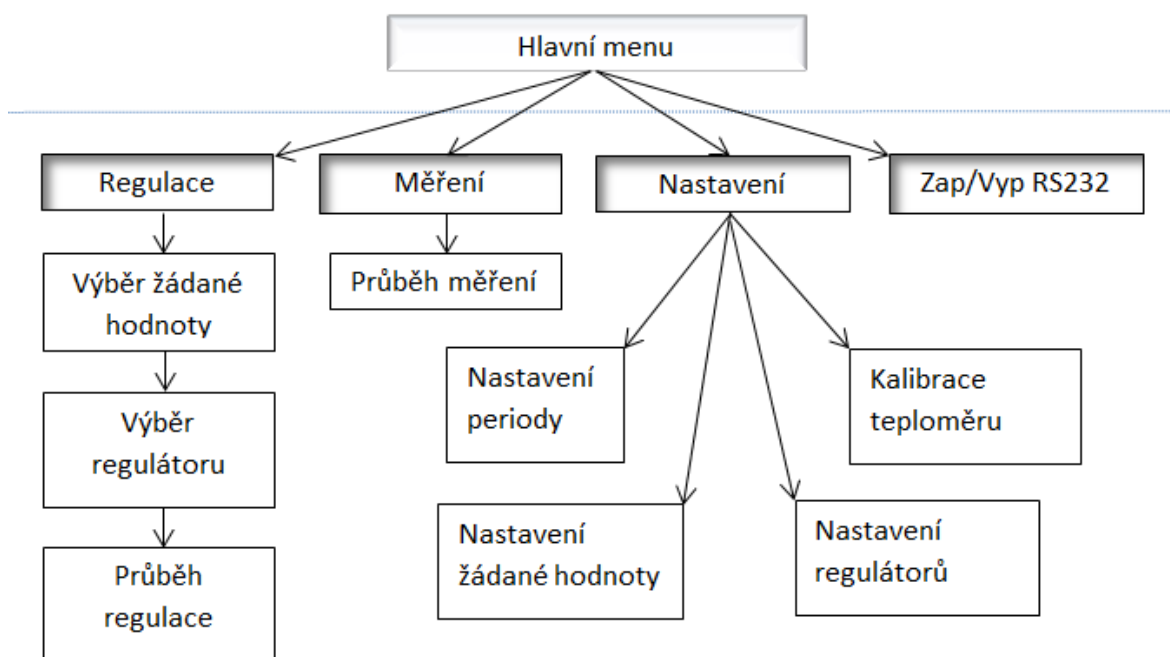
$$G_r(z^{-1}) = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}}; T_0 \quad (78)$$

## 8.2 Návod k obsluze zařízení

Zde uvedu jednotlivé položky menu a popíšu jejich funkce. Změna pozice v menu nebo úprava parametrů se provádí prostřednictvím tlačítek umístěných na víku zařízení (viz. přílohy).

Pohyb v menu se provádí tlačítky se směrovými šipkami nahoru a dolů. Tyto tlačítka slouží také v editačním zobrazení pro změnu hodnoty na aktuální editační pozici. Tlačítka se směrovými šipkami vlevo a vpravo se používají pouze v editačním zobrazení pro posuv editační pozice. Tlačítko *ESC* slouží k opuštění dané pozice. Tlačítko *OK* slouží k potvrzení nebo v editačním módu k ukládání dat. A tlačítko *STOP* je funkční pouze v módu regulace, kde okamžitě vypne regulační pochod.

Celý popis se budu snažit přehledně uvést ve stromové struktuře. Po startu zařízení se objeví hlavní menu s následujícími položkami.



Obrázek 34 – Stromová struktura menu

### 8.2.1 Regulace

Po výběru se objeví následující text: „Po stisku OK vyber žádanou hodnotu“. Pro návrat se používá tlačítko *ESC*. Po stisku *OK* bude moct uživatel vybrat vlastní nadefinovaný průběh žádané hodnoty, který se definuje v *Nastavení*. Po výběru požadovaného průběhu se objeví text „Po stisku OK vyber regulátor“. Po potvrzení si může uživatel vybrat mezi třemi typy regulátorů. Každý regulátor obsahuje deset uživatelem volených nastavení parametrů. Parametry jednotlivých uživatelem volených nastavení si volí uživatel sám v položce *Nastavení*. Po výběru požadovaného regulátoru s příslušnými parametry se spustí regulace.

Na displeji je při regulaci zobrazena aktuální požadovaná teploty (v levé části 1. řádku), aktuální naměřená teplota (v pravé části 1. řádku), aktuální akční zásah regulátoru (v levé části 2. řádku) a aktuální čas regulace (v pravé části 2. řádku). Hodnoty akčního zásahu jsou uvedeny v procentech. Čas je uveden v klasickém číslicovém formátu (HH:MM:SS). Hodnoty požadované teploty, aktuální teploty a času se mění v pravidelných intervalech jedné sekundy. Hodnota akčního zásahu se mění pouze v okamžicích periody vzorkování použitého regulátoru.

Pokud uživatel požaduje okamžitou změnu žádané hodnoty, tak stačí stisknout *OK*. Objeví se editační zobrazení, kde uživatel zadá změnu oproti aktuální žádané hodnotě.

Ukončení se může provést prostřednictvím tlačítka *ESC*. Po stisku se na displeji zobrazí text „*Po stisku OK ukončíte regulaci*“, který slouží jako prevence před nechtěným ukončením regulačního pochodu. Regulace se okamžitě ukončí po stisku červeného *STOP* tlačítka.

Pokud je aktivována komunikace RS232, tak se každou sekundu odesílají aktuální hodnoty na sériovou linku.

### 8.2.2 Měření

Na displeji se zobrazí aktuální naměřená teplota (v pravé části 1. řádku) a aktuální čas měření (v pravé části 2. řádku). Čas je uveden v klasickém číslicovém formátu (HH:MM:SS). Hodnoty se mění v pravidelných intervalech jedné sekundy.

Pokud je aktivována komunikace RS232, tak se v pravidelných periodách (viz. *Nastavení*) odesílají aktuální hodnoty na sériovou linku.

### 8.2.3 Nastavení

#### 8.2.3.1 *Nastavení periody*

Zde se nastavuje perioda odesílání dat na sériovou linku v módu měření.

#### 8.2.3.2 *Nastavení žádané hodnoty*

Zde si uživatel může navolit deset požadovaných průběhů žádané hodnoty. Průběhy mohou mít tvar skokové nebo lineární změny. Každý průběh může být definován patnácti kroky a každý krok je definován hodnotou a časem, jedná se tedy o stejný princip zadávání jako v programu *Simulink*. Pokud není vyžadováno všech patnáct kroků nebo pokud je vyžadován pouze jeden krok, tak v dalším kroku po posledním požadovaném se navolí čas, který je menší nebo roven času zadaném v předchozím kroku. Skoková změna se nastavuje následovně:

*KROK1: hodnota = 30; čas = 0*

*KROK2: hodnota = 30; čas = 50*

*KROK3: hodnota = 50; čas = 51*

*KROK4: hodnota = 50; čas = 80*

Tedy požadovaná hodnota bude v čase 0-50 sekund rovna 30°C a od času 51 až po ukončení regulace bude rovna 50°C. Lineární změna se nastavuje následujícím způsobem:

*KROK1: hodnota = 30; čas = 0*

*KROK2: hodnota = 50; čas = 50*

Požadovaná hodnota bude od času 0 po čas 50 růst lineárně od 30°C do 50°C. Od času 50 a víc bude hodnota rovna 50°C.

### 8.2.3.3 *Nastavení regulátoru*

Pro každý regulátor je vytvořeno deset uživatelem definovatelných nastavení, kde uživatel může nastavovat parametry regulátoru. Parametry se liší dle typu regulátoru (viz. kapitola Informace k nastavování regulátorů).

### 8.2.3.4 *Kalibrace teploměru*

Kalibrace teploměru se provádí za pomoci lineární funkce, která se přičte k nekalibrované teplotě.

$$T_N = T + A + B * T \quad (79)$$

Kde parametry  $A$  (konstanta) a  $B$  (směrnice) jsou nastavitelné parametry.  $T$  představuje nekalibrovanou teplotu a  $T_N$  kalibrovanou teplotu.

## 8.2.4 **Vyp/Zap RS232**

Tato položka umožňuje zapnout nebo vypnout komunikaci po sériové lince. Komunikace probíhá pouze směrem ven, rychlost komunikace je nastavena na 9600baud, používá 8bitů pro přenos informace a neobsahuje žádný paritní bit.

Číslo je v mikropočítači převedeno na text a následně je text posílán po sériové lince. Každé poslané číslo je definováno šesti znaky. Posílají se pouze tři různé hodnoty. Jedná se o výstupní teplotu, žádanou teplotu a akční zásah. Hodnoty na straně příjemce se od sebe odlišují svou velikostí. Teplota kapaliny se odesílá beze změny, k žádané teplotě se přičítá číslo 502 a k akčnímu zásahu se přičítá číslo 401. Je to založené na myšlence, že teplota kapaliny ani žádaná teplota se budou nacházet v intervalu 0 až 400 a akční zásah se bude nacházet v intervalu 0 až 100. Na straně příjemce pak stačí hodnoty od sebe rozlišit a ode-

číst přičtenou hodnotu. Hodnota -99.00 označuje konec měření nebo regulace. Pro přijímání dat na počítači jsem vytvořil soubor v programu *Matlab*, v kterém je třeba nastavit pouze správný sériový port. Přijatá data se následně vypisují do *Command Window* a ukládají do proměnné *hodnoty*. Jedná se o soubor *seriova\_linka.m*, který je přiložen na CD.

### 8.3 Přesnost měření teploty

Teplota při měření je zobrazována na setiny stupně Celsia. Nicméně v důsledku vzniklého šumu teplota v ustáleném stavu kolísá přibližně o  $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$ . Proto je aplikován softwarový filtr v podobě FIFO zásobníku na pět posledních hodnot. Výsledná hodnota je dána průměrem těchto hodnot. Nové hodnoty přicházejí v pravidelných intervalech 0.3s. Po aplikaci filtru teplota kolísá maximálně o  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ . Šum vstupující do obvodu je nejspíš důsledkem špatně voleného C-filtru umístěného na měřící desce za stabilizátorem napětí.

## 9 NÁVRH A OVĚŘENÍ REGULACE

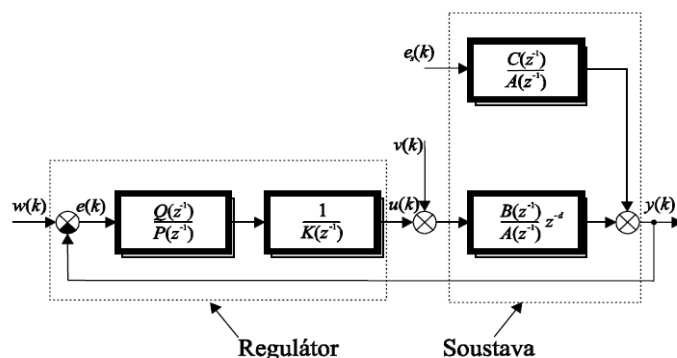
Perioda vzorkování u všech měření činila 120s, i když by měla být vzhledem k dynamice identifikovaných soustav daleko větší. Volil jsem tak z důvodu časové náročnosti jednotlivých měření a z důvodu, aby se adaptivní regulátory stihly v přechodovém ději adaptovat na danou soustavu. To však vedlo k nežádoucímu chování některých regulátorů. Dalším problémem u některých regulátorů bylo omezení akčního zásahu. Vypořádání s těmito problémy také bude uvedeno v této kapitole. Odhady parametrů pro adaptivní regulátory jsem zvolil na základě identifikovaných soustav u hnízda o výkonu 150W. Tyto parametry jsou použity i u hnízda o výkonu 480W a to proto, aby byla zdůrazněna jejich přizpůsobivost. U adaptivních regulátorů je prováděna průběžná identifikace prostřednictvím rekurzivní metody nejmenších čtverců pro druhý řád. Výpočet parametrů regulátoru inverze dynamiky byl prováděn pro každé hnízdo a každou kapalinu zvlášť, protože by se nevyvířadal se změnami parametrů odlišných soustav. Upozorňuji, že průběh naměřených hodnot nemusí být dostatečný, protože průběh regulace je časově náročný proces, neprováděl jsem zdlouhavá měření. Proto především vynechávám skokové změny na nižší požadovanou hodnotu, protože průběh chlazení je velice zdlouhavý.

Použité odhady parametrů:

$$G(z^{-1}) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} = \frac{0.02909 z^{-1} + 0.023145 z^{-2}}{1 - 1.495 z^{-1} + 0.516 z^{-2}}; T_0 = 120s$$

### 9.1 Adaptivní verze regulátoru metody konečného počtu kroků

Tato metoda se snaží docílit nulové regulační odchylky za konečný počet kroků a regulační odchylka se bude blížit nule i mimo okamžiky vzorkování.



Obrázek 35 – Blokové schéma regulačního obvodu s jedním stupněm volnosti

Přenos řízení je ve tvaru:

$$G_W(z) = \frac{Y(Z)}{W(z)} = \frac{B(z^{-1})Q(z^{-1})}{A(z^{-1})K(z^{-1})P(z^{-1}) + B(z^{-1})Q(z^{-1})} \quad (80)$$

Pro zjednodušení se zvolí polynom  $K(z^{-1}) = 1$ . (Aby bylo docíleno nulové regulační odchylky v konečném počtu kroků, musí být polynom  $E(z^{-1})$  co nejjednodušší. Tato podmínka bude splněna, pokud polynom  $E(z^{-1})$  nebude ve tvaru zlomku, tedy platí následující:

$$A(z^{-1})P(z^{-1}) + B(z^{-1})Q(z^{-1}) = 1 \quad (81)$$

Polynom  $E(z^{-1})$  následně ve tvar:

$$\begin{aligned} E(z^{-1}) &= W(z^{-1}) - Y(z^{-1}) \\ &= \left( 1 - \frac{B(z^{-1})Q(z^{-1})}{A(z^{-1})P(z^{-1}) + B(z^{-1})Q(z^{-1})} \right) W(z^{-1}) \\ &= (1 - B(z^{-1})Q(z^{-1}))W(z^{-1}) = \end{aligned} \quad (1)$$

Pro soustavu druhého řádu a skokovou změnu žádané hodnoty platí:

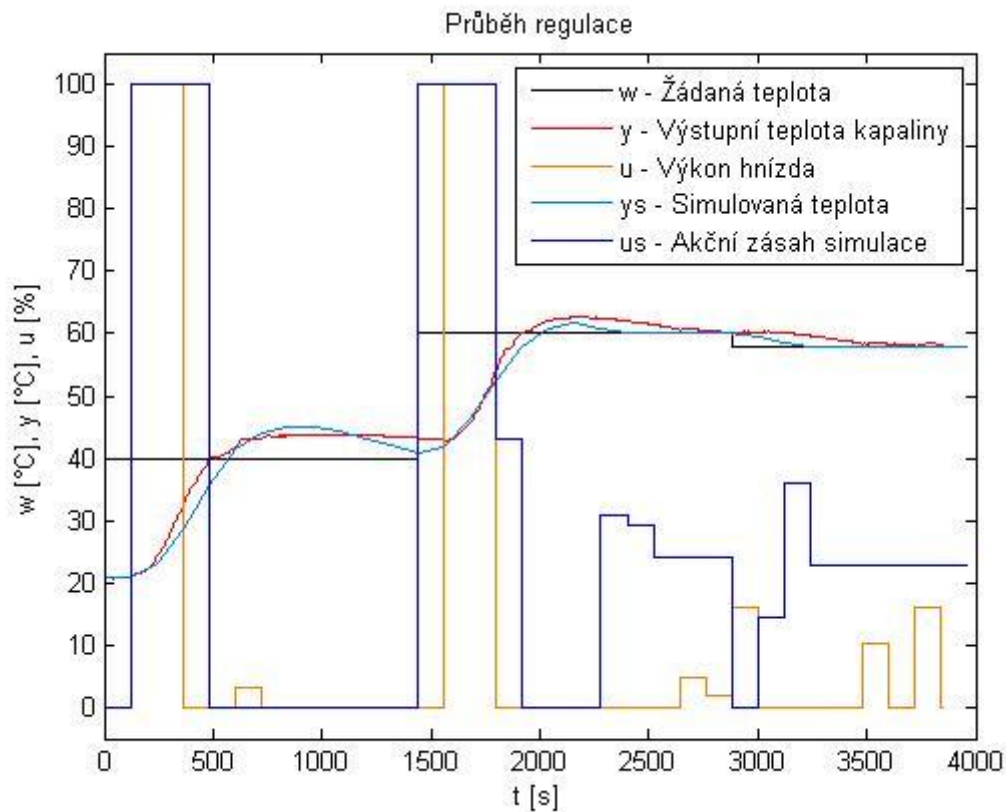
$$\begin{aligned} (1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2})(1 - z^{-1})(p_0 + p_1z^{-1}) \\ + (b_1z^{-1} + b_2z^{-2})(q_0 + q_1z^{-1} + q_2z^{-2}) = 1 \end{aligned} \quad (2)$$

Pak (parametry  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  jsou dále parametry získané prostřednictvím průběžné identifikace):

$$\begin{pmatrix} b_1 & 0 & 0 & 1 \\ b_2 & b_1 & 0 & a_1 - 1 \\ 0 & b_2 & b_1 & a_2 - a_1 \\ 0 & 0 & b_2 & -a_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ p_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - a_1 \\ a_1 - a_2 \\ a_2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Diferenční rovnice regulátoru je následně ve tvaru: [1]

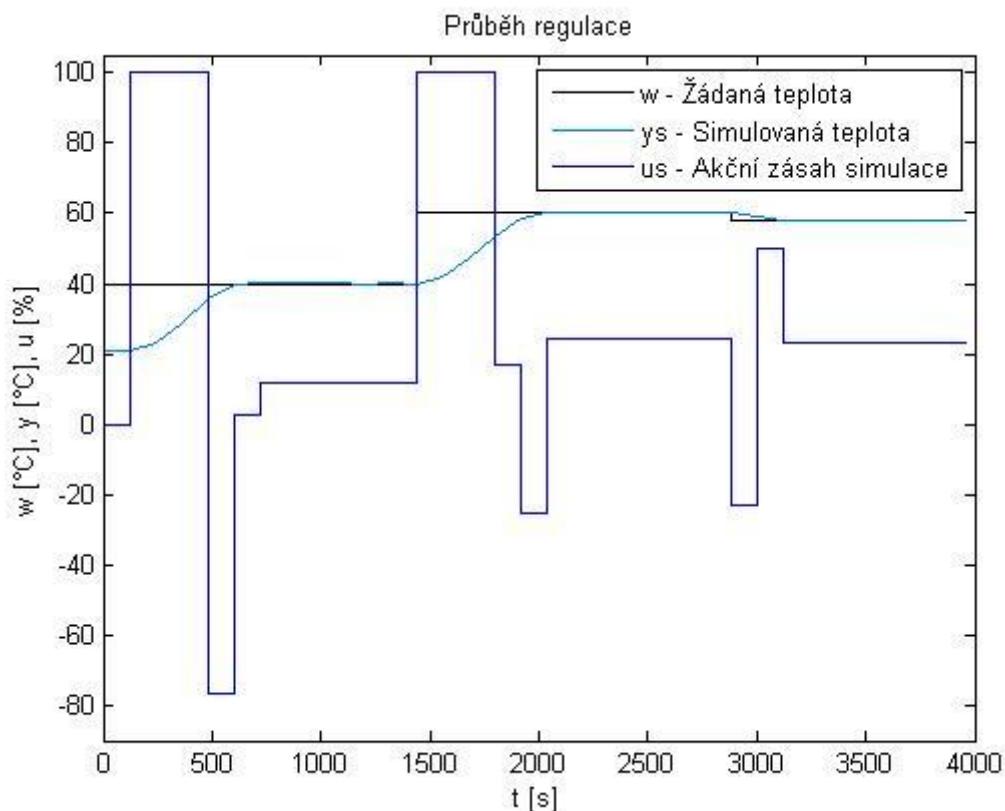
$$\begin{aligned} u(k) &= q_0e(k) + q_1e(k-1) + q_2e(k-2) + (1 - p_1)u(k-1) \\ &\quad + p_1u(k-2) \end{aligned} \quad (4)$$



Obrázek 36 – Průběh naměřených a simulovaných hodnot regulace

**Komentář k obrázku 36:**

Jako kapalina u reálného měření byla použita voda o objemu 280ml. Použité hnízdo má výkon 150W. Hlavní diagonála matice  $C$  byla vyplněna hodnotami 1000. Naměřené i simulované teploty si jsou navzájem celkem podobné. Avšak simulované hodnoty mají rychlejší průběh chlazení. To pravděpodobně způsobeno nepřesnou identifikací soustavy. Akční zásahy také nesouhlasí. To může být způsobeno postupnou změnou parametrů regulátoru zapříčiněnou průběžnou identifikací. Parametry identifikované soustavy jsem v průběhu měření sledoval a změna byla značná. Jelikož hnízdo je vybaveno vestavěným indukčním mícháním, tak v průběhu regulačního procesu docházelo k míchání kapaliny, ale pouze v době kdy bylo relé sepnuté. V důsledku toho byly vytvořeny nehomogenní podmínky, a tak nedocházelo ke správnému měření teploty, což mohlo v kombinaci s daným nastavením matice  $C$  zapříčinit větší změnu parametrů identifikované soustavy. Parametry se v ustálených pasážích přibližovaly zpět k počátečním odhadům. Tento problém se týká všech provedených měření na hnízdě o výkonu 150W. Vzniklý překmit vzniká z důvodu omezení akčního zásahu záporných hodnot, důkazem je následující simulace:



Obrázek 37 – Simulace regulačního pochodu bez omezení záporných akčních zásahů

#### Komentář k obrázku 37:

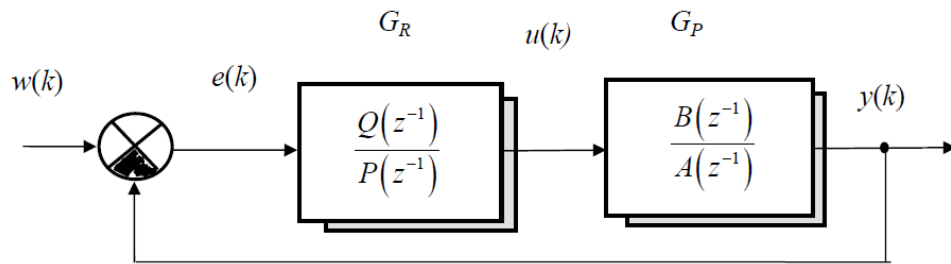
Bez omezení akčního zásahu si regulátor hravě poradí s průběhem regulace.

#### Závěrečné vyhodnocení regulátoru:

Takto navržený regulátor není vhodný pro regulaci topného hnízda, protože se objevují nežádoucí překmity. Volbou vhodnější periody vzorkování by mohlo být docíleno kvalitnějšího regulačního pochodu. Bylo provedeno více měření, které jsou přiloženy na CD.

## 9.2 Adaptivní verze regulátoru metody přiřazení pólů

Přiřazení pólů zpětnovazebnímu regulačnímu obvodu dovoluje nastavování požadovaných regulačních vlastností jako je kmitání, tlumení a podobně.



Obrázek 38 – Schéma regulačního obvodu

Pak přenos řízení:

$$G_W(z) = \frac{Y(z)}{W(z)} = \frac{B(z^{-1})Q(z^{-1})}{A(z^{-1})P(z^{-1}) + B(z^{-1})Q(z^{-1})} \quad (5)$$

$$A(z^{-1})P(z^{-1}) + B(z^{-1})Q(z^{-1}) = D(z^{-1}) \quad (6)$$

Na pravou stranu diofantické rovnice se pak umístí polynom s požadovanými póly. V případě použitého regulátoru v zařízení je polynom zadán následovně:

$$D(z) = (z - \alpha)^4 \quad (7)$$

Tedy volí se pouze jeden čtyřnásobný pól.

Pro soustavu druhého řádu platí:

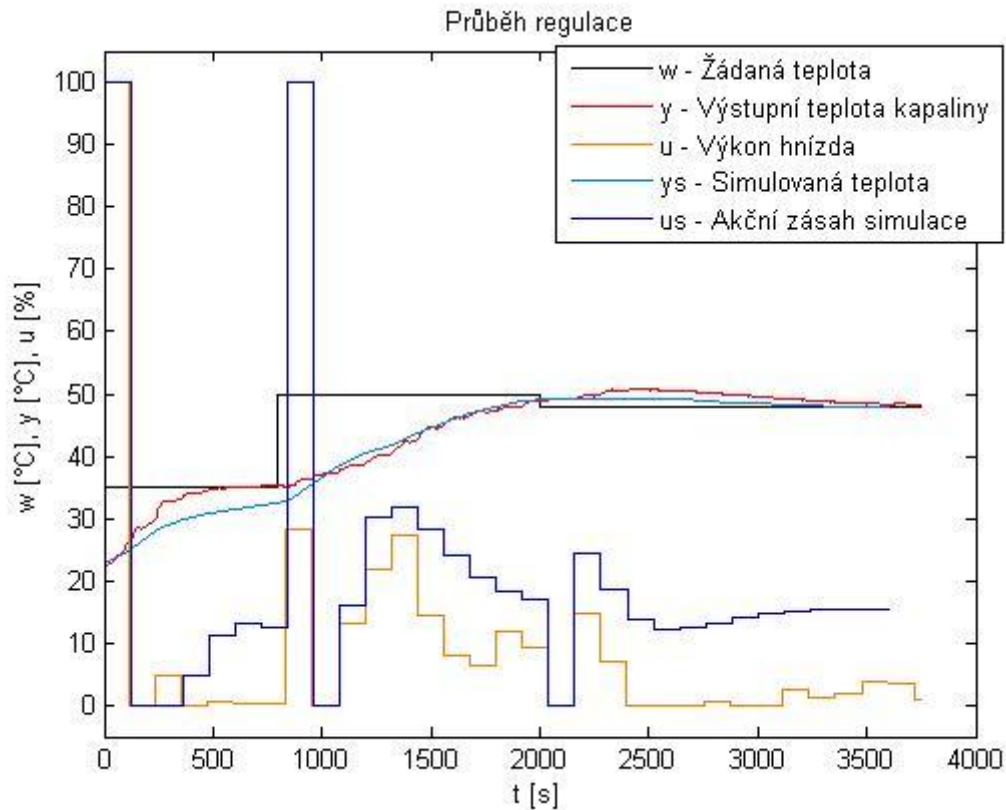
$$\begin{aligned} & (1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2})(1 - z^{-1})(p_0 + p_1 z^{-1}) \\ & + (b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2})(q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}) = \\ & 1 - 4 \alpha z^{-1} + 6 \alpha^2 z^{-2} - 4 \alpha^3 z^{-3} + \alpha^4 z^{-4} \end{aligned} \quad (8)$$

Porovnání koeficientů se získají čtyři rovnice o čtyřech neznámých (parametry  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  jsou dále parametry získané prostřednictvím průběžné identifikace):

$$\begin{pmatrix} b_1 & 0 & 0 & 1 \\ b_2 & b_1 & 0 & a_1 - 1 \\ 0 & b_2 & b_1 & a_2 - a_1 \\ 0 & 0 & b_2 & -a_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ p_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -4 \alpha + 1 - a_1 \\ 6 \alpha^2 + a_1 - a_2 \\ -4 \alpha^3 + a_2 \\ \alpha^4 \end{pmatrix} \quad (9)$$

Diferenční rovnice regulátoru je následně ve tvaru: [1]

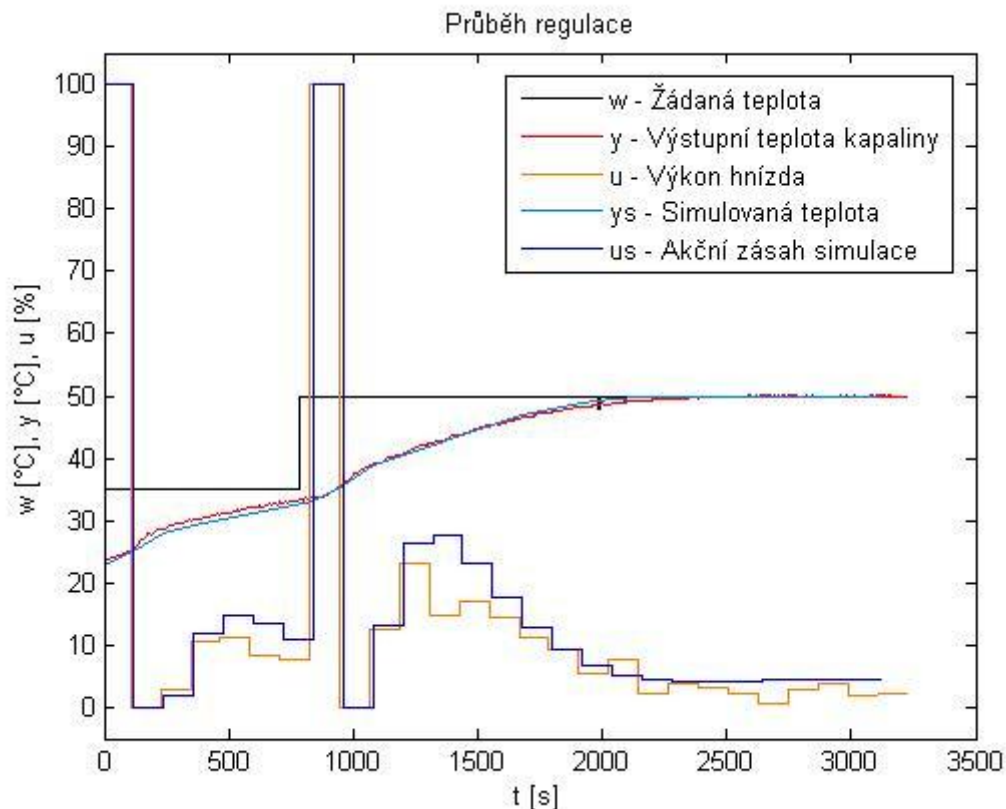
$$\begin{aligned} u(k) = & q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2) + (1 - p_1)u(k-1) \\ & + p_1 u(k-2) \end{aligned} \quad (10)$$



Obrázek 39 - Průběh naměřených a simulovaných hodnot regulace

**Komentář k obrázku 39:**

Jako kapalina u reálného měření byla použita voda o objemu 280ml. Použité hnízdo má výkon 150W. Hlavní diagonála matice  $C$  byla vyplněna hodnotami 1 a volitelný parametr  $\alpha$  je 0.45. Dle průběhu naměřených a simulovaných teplot a příslušných akčních zásahů je patrné, že soustava není správně identifikována. Za zmínku také stojí kolísající teplota u naměřených hodnot, která je způsobena špatným promícháváním kapaliny. Krok po poklesu žádané hodnoty je patrná nežádoucí reakce regulátoru, kdy akční zásah vzroste, i když je regulační odchylka záporná. To je způsobenou kombinací špatně zvolené periody vzorkování a omezením akčního zásahu.



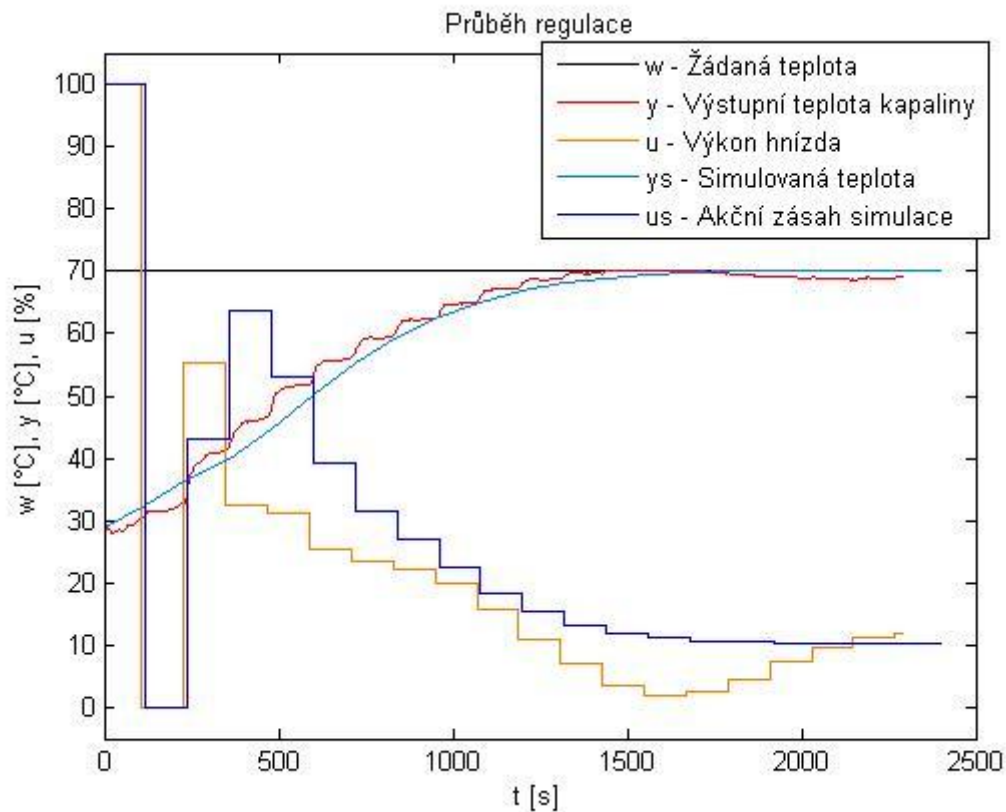
Obrázek 40 - Průběh naměřených a simulovaných hodnot regulace

#### Komentář k obrázku 40:

Jako kapalina u reálného měření byla použita voda o objemu 1500ml. Použité hnízdo má výkon 480W. Hlavní diagonála matice  $C$  byla vyplněna hodnotami 1 a volitelný parametr  $\alpha$  je 0.45. Dle průběhu naměřených a simulovaných teplot a příslušných akčních zásahů je patrné, že soustava je správně identifikována. Naměřená teplota v tomto případě nekolísá, protože kapalina není promíchávána.

#### Komentář k obrázku 41:

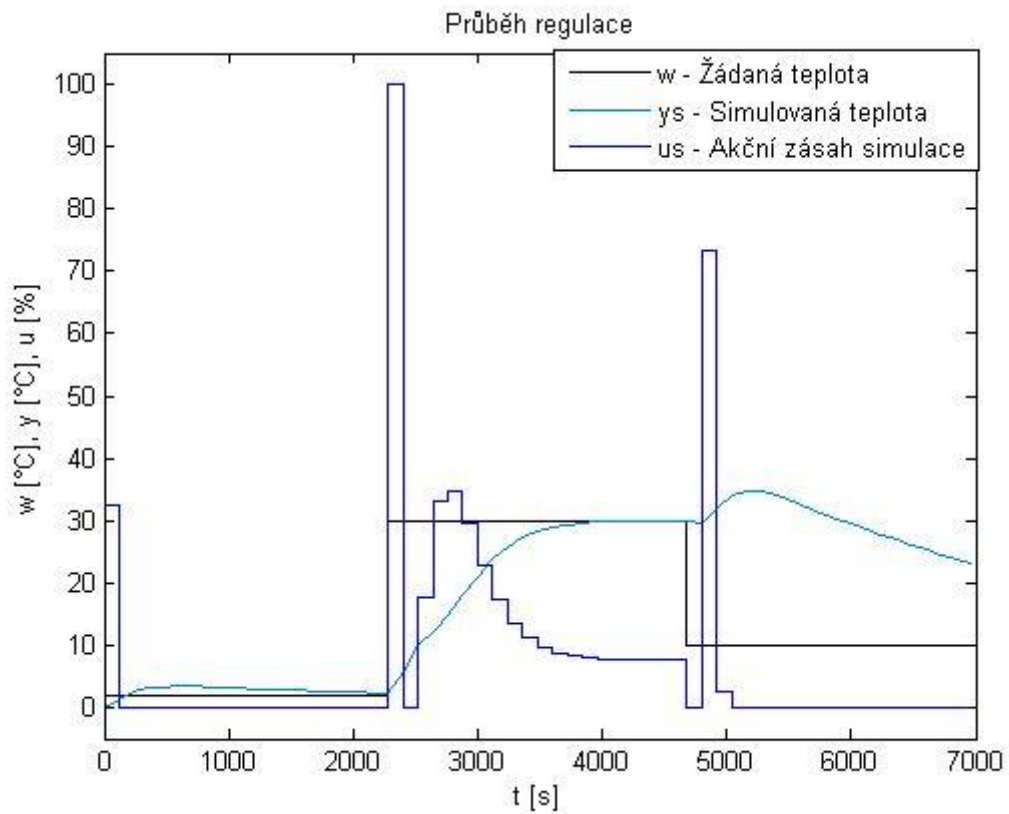
Jako kapalina u reálného měření byl použit propylenglykol o objemu 280ml. Použité hnízdo má výkon 150W. Hlavní diagonála matice  $C$  byla vyplněna hodnotami 1 a volitelný parametr  $\alpha$  je 0.45. Dle průběhu naměřených a simulovaných teplot a příslušných akčních zásahů je patrné, že soustava je správně identifikována. Naměřená teplota zde opět kolísá, protože se jedná o hnízdo poskytující míchání. Po dosažení žádané teploty, teplota kapaliny mírně poklesne, avšak dle akčního zásahu je patrné, že regulátor na tento nežádáný jev reaguje.



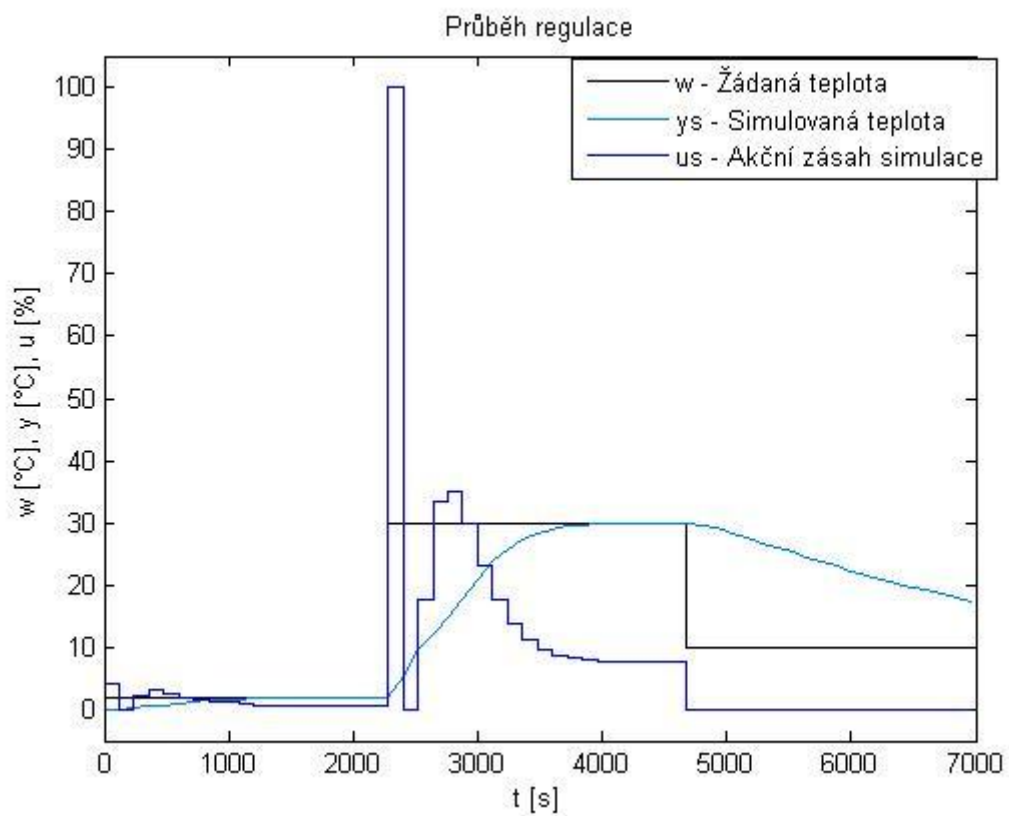
Obrázek 41 - Průběh naměřených a simulovaných hodnot regulace

**Problémy spojení s omezením akčního zásahu a špatné volby periody vzorkování:****Komentář k obrázku 42:**

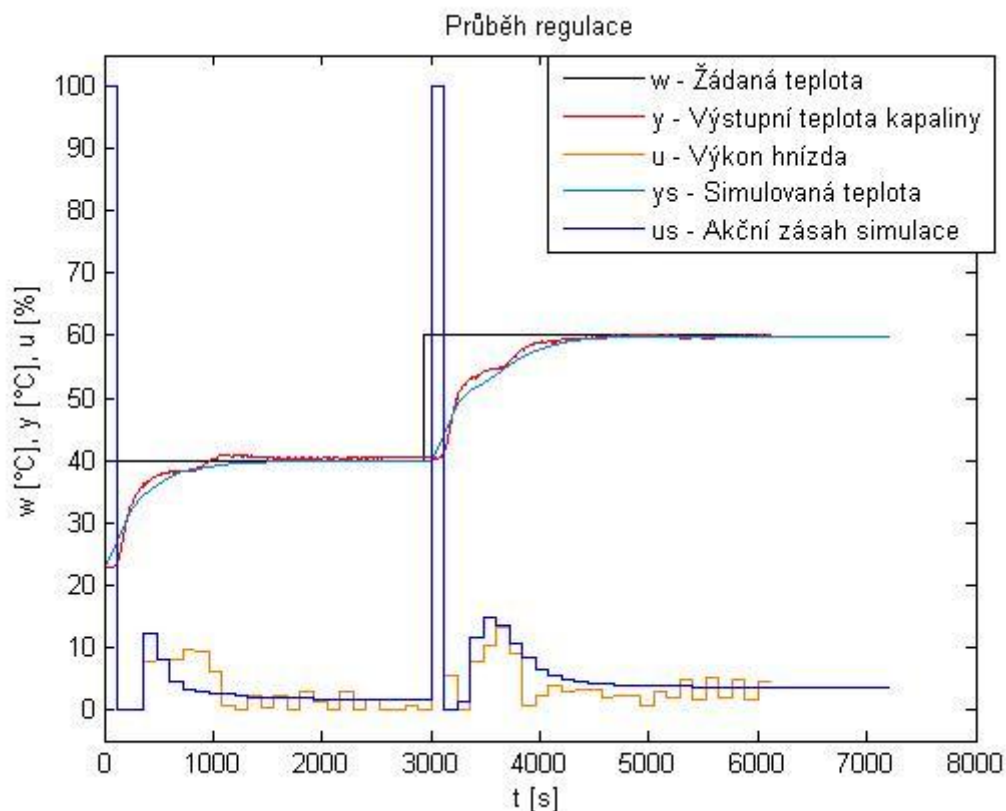
Regulátor na malé zvýšení žádané teploty vyvolá zbytečně velký akční zásah. Při snížení žádané hodnoty regulátor v dalším kroku také vyvolá akční zásah. To je způsobeno právě vlivem omezení akčního zásahu související s nevhodně zvolenou periodou vzorkování. V prvním případě je akční zásah vyvolán parametrem regulátoru  $q_0$ , protože vliv parametru  $q_1$  (vycházející záporně) a  $q_2$  je regulační odchylkou nulován. V druhém případě je to způsobeno parametrem  $q_1$ , jehož absolutní hodnota je při dané periodě vzorkování vyšší než hodnota parametru  $q_0$  (vliv parametru  $q_0$  je regulační odchylkou nulován) a tak vyvolá akční zásah. Kdyby však nebyl omezen akční zásah, tak regulátor by se s těmito problémy vypořádal. Proto jsem aplikoval vhodné podmínky zamezující výskytu těchto jevů. Výsledek je zobrazen na Obrázku 43. Tyto podmínky nebyly aplikovány na regulátor v předcházejících měřeních. Pokud bude regulátor nastaven správně, tak nebudou mít aplikované podmínky vliv na regulační pochod.



Obrázek 42 – Simulace zobrazující nežádoucí jevy



Obrázek 43 - Simulace zobrazující kompenzaci nežádoucích jevů



Obrázek 44 - Průběh naměřených a simulovaných hodnot regulace

**Komentář k obrázku 44:**

Jako kapalina u reálného měření byl použit propylenglykol o objemu 1000ml. Použité hnízdo má výkon 480W. Hlavní diagonála matice  $\mathbf{C}$  byla vyplněna hodnotami 1 a volitelný parametr  $\alpha$  je 0.45. Dle průběhu naměřených a simulovaných teplot a příslušných akčních zásahů je patrné, že soustava je identifikována správně. V tomto měření už byly aplikovány podmínky zmíněné výše.

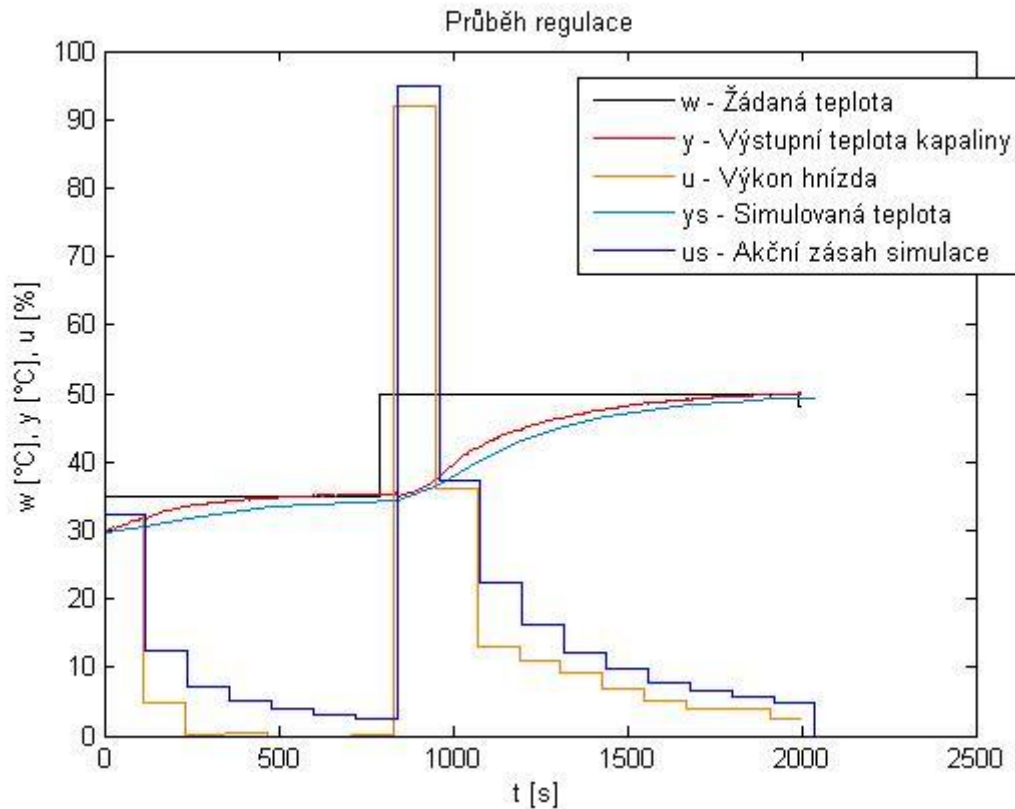
**Závěrečné vyhodnocení regulátoru:**

Takto navržený regulátor je vhodný pro řízení teploty topných hnízd. Změnou parametru  $\alpha$  nebo zvolení optimálnější periody vzorkování, může být dosaženo určitě ještě lepších regulačních pochodů.

**9.3 Regulátoru navržený metodou inverze dynamiky**

Výsledný tvar regulátoru navržený na topné hnízdo o výkonu 480W zahřívající vodu o objemu 1500ml:

$$G_r = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}} = \frac{6.1882 - 9.1464 z^{-1} + 3 z^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad (11)$$



Obrázek 45 - Průběh naměřených a simulovaných hodnot regulace

#### Komentář k obrázku 45:

Průběhy teploty a akčních zásahů jsou si dosti podobné. Rozdíl teplot v prvním skoku je nespíš způsobeno topným hnízdem, kdy hnízdo dodává akumulovanou energii v něm získanou v předchozím experimentu.

#### Závěrečné vyhodnocení regulátoru:

Regulátor pracuje spolehlivě. Jedinou jeho nevýhodou je, že se musí pro každou jinou soustavu definovat nové parametry, jelikož se nedokáže přizpůsobit změnám způsobenými neurčitostí systému.

## ZÁVĚR

Diplomová práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části jsou uvedeny teoretické základy a některé z nich jsou pak aplikovány v praktické části.

První bod teoretické části je zaměřen na obecné informace, co se týká samotné teorie řízení. Jsou zde uvedeny pojmy související s řízením, základní typy řízení a veličiny, s kterými proces řízení pracuje. V dalším bodu se věnuji identifikaci. Ta je rozdělena na modelování a experimentální identifikaci. Obě tyto metody jsou detailněji popsány a je uveden postup, jak se s jednotlivými metodami pracuje. Následně se zaměřuji na popis lineárního a nelineárního spojitého dynamického systému. Dále jsou v této kapitole popsány metody regresní analýzy nazývané metoda nejmenších čtverců a rekursivní metoda nejmenších čtverců. V třetí kapitole se zabývám rozdílem mezi diskrétním a spojitým řízením a regulátorům, které se dokážou vypořádat se systémy s časově proměnnými nebo neurčitými parametry. Poslední kapitola teoretické části je věnována vybraným akčním členům a senzorům používaným v chemické laboratoři.

V praktické části uvádím popis topné hnízda, který se používá k experimentálním účelům. Poté je vytvořen jeho matematický model, ze kterého je odvozen přenos topného hnízda. Další bod se věnuje měřením a identifikaci vybraných topných hnízd vyhřívajících danou kapalinu. Identifikace soustav pak byla provedena pomocí funkce *fminsearch*, která je součástí programu *Matlab*. Další část se věnuje hardwaru, ze kterého byl zhotoven finální výrobek, který slouží pro regulaci teploty tepelných soustav. V dalším bodu popisuji navržený software, ve kterém se snažím přiblížit strukturu programu a jak program pracuje. Je zde také uveden návod k použití. Výrobek obsahuje dva typy adaptivních regulátorů a jeden typ klasického diskrétního regulátoru. V posledním bodu se věnuji ověření vyrobeného zařízení na topných hnízdech. Doporučuji používat adaptivní regulátor metody přiřazení pólů, který se nejlépe osvědčil. Při vhodnější volbě parametrů bude dosahovat určitě kvalitnějších regulačních pochodů. Regulátor navržený metodou inverze dynamiky je taktéž vhodný. Avšak musí se pro daná topná hnízda přepočítávat parametry regulátoru. Naopak adaptivní regulátor s použitým nastavením nedoporučuji k regulaci teploty na topných hnízdech.

## CONCLUSION

The thesis is divided into theoretical part and practical part. In the theoretical part, I introduce the theoretical foundations and some of them are then applied in the practical part.

The first point of the theoretical part is focused on general information as to the actual theory of control. There are concepts related to control, basic control types and variables, with which the control process works. The next section I devoted to identification. It is divided into modeling and experimental identification. Both of these methods are more deeply described and dealing particular methods is described. Then I focus on the description of the linear and nonlinear continuous dynamic system. In addition, this chapter describes the methods of regression analysis called the least squares method and recursive least squares method. In the third chapter, I examine the difference between discrete and continuous control and regulators that are able to deal with systems with time-varying or uncertain parameters. The last chapter of the theoretical part is dedicated to selected actuators and sensors used in the chemical laboratory.

In the practical part, I mention the description of the heating mantle, which is used for experimental purposes. Subsequently, the mathematical model is created and then the mantle transfer function is derived from this model. The next section is devoted to the measurement and identification of selected mantles heating the given liquid. System identification was performed by using the function *fminsearch*, which is part of *Matlab*. Another part deals with hardware from which the final product, which is used for temperature control of heating systems, was made. In the next section I describe the designed software and I try to show the structure of the program and how the program works. This section also provides instructions for use. The product includes two types of adaptive controller and one type of classical discrete controller. The last section is devoted to the verification of manufactured equipment for heating mantle. I recommend using the adaptive controller pole placement method that worked best. With appropriate choice of parameters it will definitely achieve better regulatory processes. The controller designed by using inverse dynamics is also suitable. However, the controller parameters have to be recalculated for given heating mantles. Contrary, I do not recommend the adaptive controller with used setting for the temperature control of the heating mantles.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BOBÁL, Vladimír. *Adaptivní a prediktivní řízení*. 1. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2008, 134 s. ISBN 978-80-7318-662-3.
- [2] BOBÁL, Vladimír. *Identifikace systémů*. 1. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2009, 128 s. ISBN 978-80-7318-888-7.
- [3] DOSTÁL, Petr a Radek MATUŠŮ. *Stavová a algebraická teorie řízení*. 1. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 90 s. ISBN 978-80-7318-991-4.
- [4] HRUŠKA, František. *Senzory: fyzikální principy, úpravy signálů, praktické použití (e-book)*. 2. rozš. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011, [202] s. ISBN 978-80-7454-096-7.
- [5] HRUŠKA, František. *Technické prostředky integrované automatizace*. 1. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2012, 345 s. ISBN 978-80-7454-234-3.
- [6] TIŠNOVSKÝ, Pavel. Nelineární dynamické systémy. In: *Fraktály* [online]. 1999 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z:  
[http://www.fit.vutbr.cz/~tisnovpa/fract/clanky/2.htm#tth\\_sEc1.2.2](http://www.fit.vutbr.cz/~tisnovpa/fract/clanky/2.htm#tth_sEc1.2.2)
- [7] DOSTÁL, Petr a František GAZDOŠ. *Řízení technologických procesů*. 1. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2006, 98 s. ISBN 80-7318-465-6.
- [8] TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. Linearizace matematického modelu [online]. [2000] [cit. 2013-05-18]. Dostupné z:  
<http://www.mti.tul.cz/files/zsr/Linearizace.pdf>
- [9] ŠEBEK, Michael. *20 - Číslicové a diskrétní řízení* [online]. 2013 [cit. 2013-06-02]. Dostupné z: [http://www.polyx.com/\\_ari/slajdy/Bas-ARI-20-Digital.pdf](http://www.polyx.com/_ari/slajdy/Bas-ARI-20-Digital.pdf)
- [10] JSP S.R.O. *Odporové snímače teploty* [online]. [2000] [cit. 2013-05-27]. Dostupné z: [http://www.jsp.cz/files/uvod\\_C.pdf](http://www.jsp.cz/files/uvod_C.pdf)
- [11] FREESCALE SEMICONDUCTOR. *MC9S08AC128 Series Reference Manual* [online]. Rev. 3. 2008, 336 s. [cit. 2013-06-01]. Dostupné z:  
[http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/ref\\_manual/MC9S08AC128RM.pdf](http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/ref_manual/MC9S08AC128RM.pdf)
- [12] MICROCHIP. *Precision RTD Instrumentation for Temperature Sensing* [online]. 2008 [cit. 2013-06-01]. Dostupné z:  
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01154a.pdf>

- [13] ATMEL. *SPI Serial EEPROMs AT25128A\_256A* [online]. 2007 [cit. 2013-06-01]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/dokumentace/414/414-057/dsh.414-057.1.pdf>
- [14] CARLO GAVAZZI. *Solid State Relays Industrial* [online]. 2003 [cit. 2013-06-01]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/dokumentace/635/635-241/dsh.635-241.1.pdf>
- [15] MICROCHIP. *MCP3550/1/3: Low-Power, Single-Channel 22-Bit Delta-Sigma ADCs* [online]. 2009 [cit. 2013-06-01]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21950e.pdf>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

|                   |  |
|-------------------|--|
| ARX               | AutoRegressive with eXogenous input                                  |
| ARMAX             | AutoRegressive Moving Average with eXogenous input                   |
| MNČ               | Metoda nejmenších čtverců  |
| RMNČ              | Rekurzivní metoda nejmenších čtverců                                 |
| A/D               | Analogově digitální  |
| D/A               | Digitálně analogový  |
| SSR               | Polovodičové relé  |
| PWM               | Pulsně-šířková modulace  |
| PID               | Proporcionálně integračně derivační regulátor                        |
| <i>fminsearch</i> | Function minimal search  |
| PT1000            | Platinový senzor teploty s odporem 1000 ohmů                         |
| PE                | Ochranný vodič   |
| N                 | Střední vodič  |
| FLASH             | Nevolatilní elektricky programovatelná paměť s libovolným přístupem. |
| EEPROM            | Nevolatilní elektricky mazatelná programovatelná paměť               |
| TPM               | Časově-pulsní modulace   |
| SCI               | Sériové komunikační rozhraní   |
| SPI               | Sériové periferní rozhraní   |
| LQFP              | Nízko profilové čtyřstranné pouzdro                                  |

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

|  |    |
|--|----|
| Obrázek 1 Přímovazební řízení (ovládání) .....   | 14 |
| Obrázek 2 Zpětnovazební řízení (regulace) .....  | 14 |
| Obrázek 3 Vztah jednotlivých veličin na řízený systém .....  | 15 |
| Obrázek 4 – Blokové schéma obecného stochastického procesu .....   | 25 |
| Obrázek 5 – Diskrétní řídicí systém a spojitý řízený systém [9] .....  | 29 |
| Obrázek 6 – Blokové schéma obecného adaptivního systému .....  | 32 |
| Obrázek 7 – Adaptivní regulátory založené na heuristickém přístupu .....                                     | 33 |
| Obrázek 8 – Blokové schéma adaptivního regulátoru s referenčním modelem .....                                | 34 |
| Obrázek 9 – Vnitřní struktura samočinně se nastavujícího regulátoru .....                                    | 35 |
| Obrázek 10 – Teplotní snímače, vlevo do jímky, vpravo s jímkou .....   | 37 |
| Obrázek 11 - Schéma elektromagnetického přepínacího relé .....   | 38 |
| Obrázek 12 – Schéma stykače .....  | 39 |
| Obrázek 13 – Vizuální ukázka topného hnízda .....  | 41 |
| Obrázek 14 - Zjednodušený náčrt topného hnízda .....   | 42 |
| Obrázek 15 – Náčrt veličin určující stavová popis .....  | 46 |
| Obrázek 16 – Napěťový dělič použitý pro měření .....   | 49 |
| Obrázek 17 – Schéma pro výpočet teploty v programu Simulink .....  | 50 |
| Obrázek 18 – Ukázka dvou měření, objem vody se shodoval .....  | 51 |
| Obrázek 19 – Porovnání naměřených hodnot a simulovaných hodnot získaných<br>z identifikovaných přenosů ..... | 52 |
| Obrázek 20 – Přejchodová charakteristika průměrovaného přenosu .....   | 53 |
| Obrázek 21 - Porovnání naměřených hodnot a simulovaných hodnot .....   | 53 |
| Obrázek 22 – Přejchodová charakteristika získaného přenosu .....   | 54 |
| Obrázek 23 - Porovnání naměřených hodnot a simulovaných hodnot .....   | 55 |
| Obrázek 24 - Přejchodová charakteristika získaného přenosu .....   | 55 |
| Obrázek 25 - Porovnání naměřených hodnot a simulovaných hodnot .....   | 56 |
| Obrázek 26 - Přejchodová charakteristika získaného přenosu .....   | 57 |
| Obrázek 27 – Pohled na víko zařízení .....   | 58 |
| Obrázek 28 – Schéma silové části zařízení .....  | 59 |
| Obrázek 29 – Zapojení AD převodníku pro aplikaci měření teploty .....  | 60 |
| Obrázek 30 – Komunikace převodníku po lince SPI .....  | 61 |
| Obrázek 31 – Průběh komunikace při čtení .....   | 62 |

---

|  |    |
|--|----|
| Obrázek 32 – Průběh komunikace při zápisu .....                                      | 63 |
| Obrázek 33 – Boční pohled na zařízení .....  | 64 |
| Obrázek 34 – Stromová struktura menu .....   | 67 |
| Obrázek 35 – Blokové schéma regulačního obvodu s jedním stupněm volnosti .....       | 71 |
| Obrázek 36 – Průběh naměřených a simulovaných hodnot regulace .....                  | 73 |
| Obrázek 37 – Simulace regulačního pochodu bez omezení záporných akčních zásahů ..... | 74 |
| Obrázek 38 – Schéma regulačního obvodu .....   | 75 |
| Obrázek 39 - Průběh naměřených a simulovaných hodnot regulace .....                  | 76 |
| Obrázek 40 - Průběh naměřených a simulovaných hodnot regulace .....                  | 77 |
| Obrázek 41 - Průběh naměřených a simulovaných hodnot regulace .....                  | 78 |
| Obrázek 42 – Simulace zobrazující nežádoucí jevy .....                               | 79 |
| Obrázek 43 - Simulace zobrazující kompenzaci nežádoucích jevů .....                  | 79 |
| Obrázek 44 - Průběh naměřených a simulovaných hodnot regulace .....                  | 80 |
| Obrázek 45 - Průběh naměřených a simulovaných hodnot regulace .....                  | 81 |

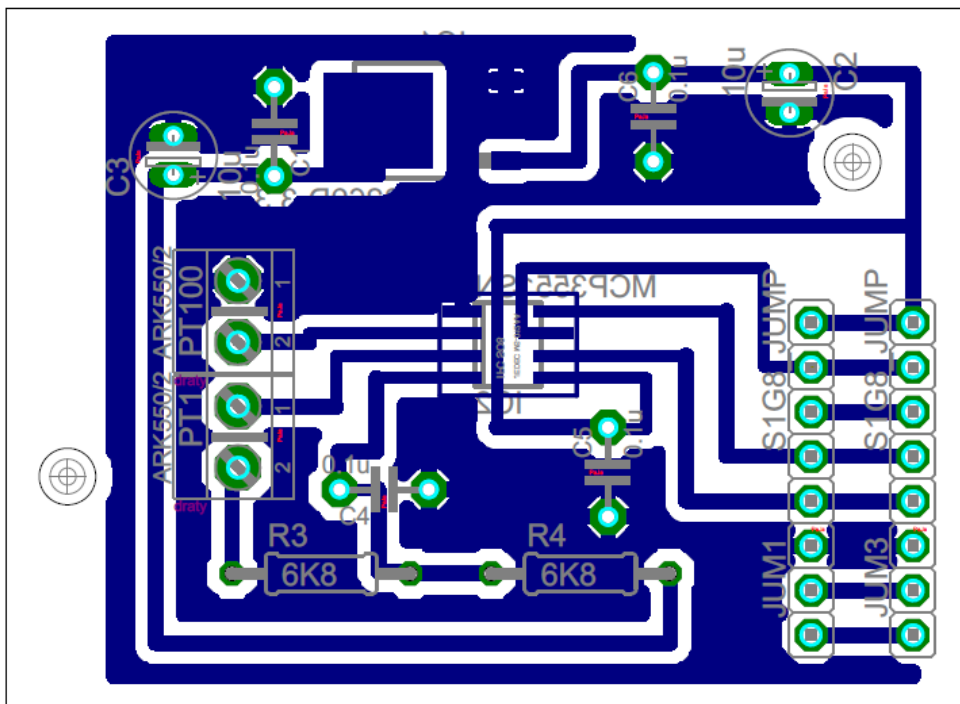
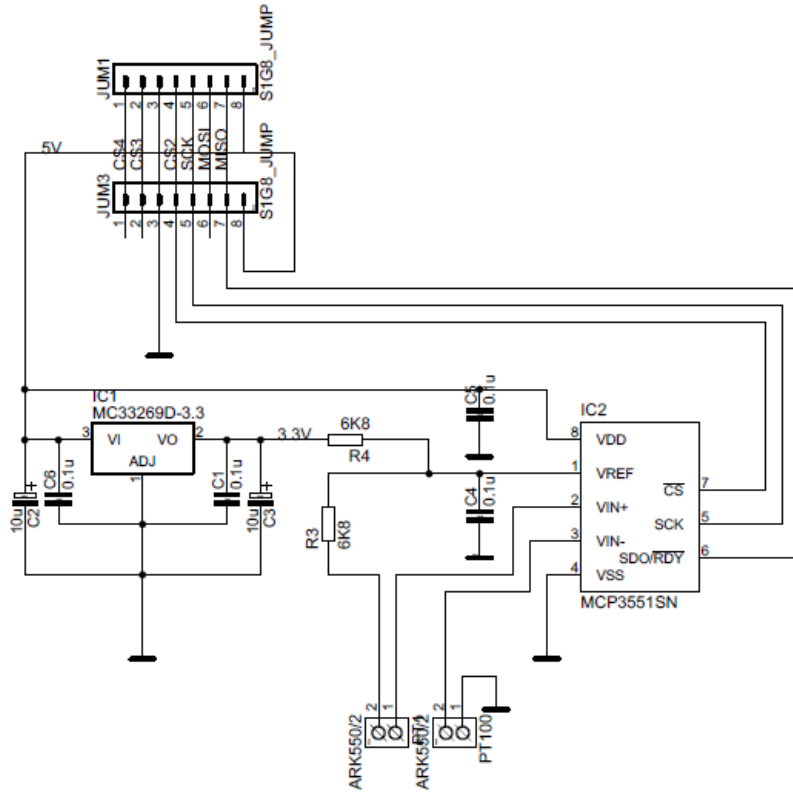
## SEZNAM TABULEK

|   |    |
|---|----|
| Tabulka 1 – Porovnání vybraných fyzikálních parametrů vody a propylenglykolu..... | 50 |
|---|----|

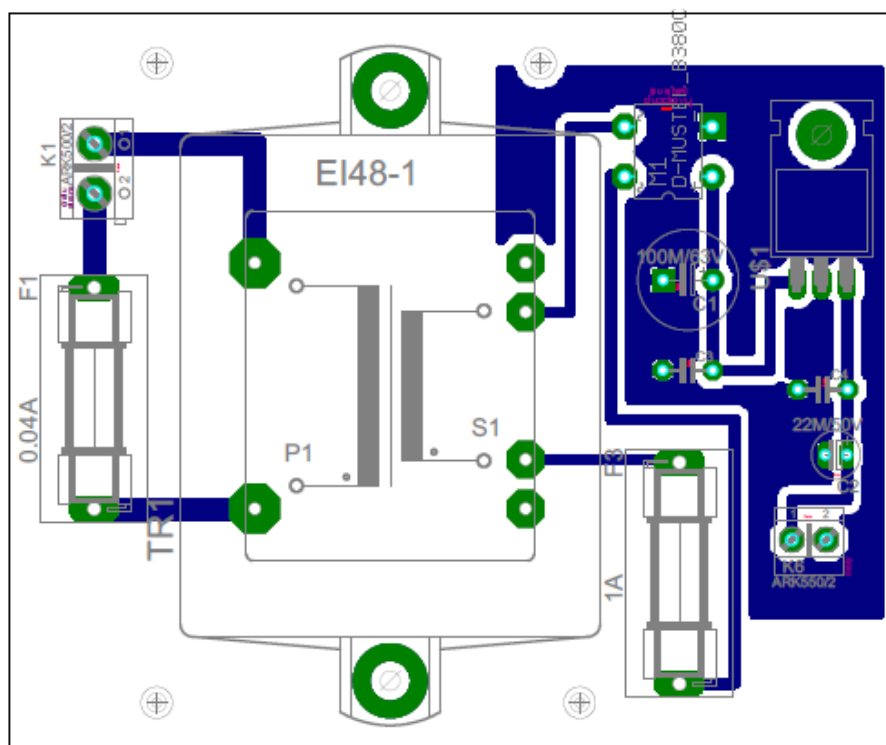
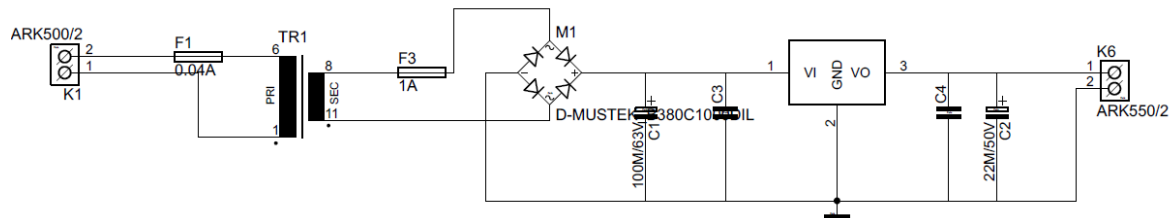
**SEZNAM PŘÍLOH**

- PI Schéma zapojení a osazovací plán měřicí desky.
- PII Schéma zapojení a osazovací plán napájecí desky.
- PIII Schéma zapojení a osazovací plán řídicí desky.
- PIV Seznam použitých součástek.
- PV Fotodokumentace.
- PVI Přílohy na CD obsahující naměřené hodnoty a zdrojový kód softwaru.

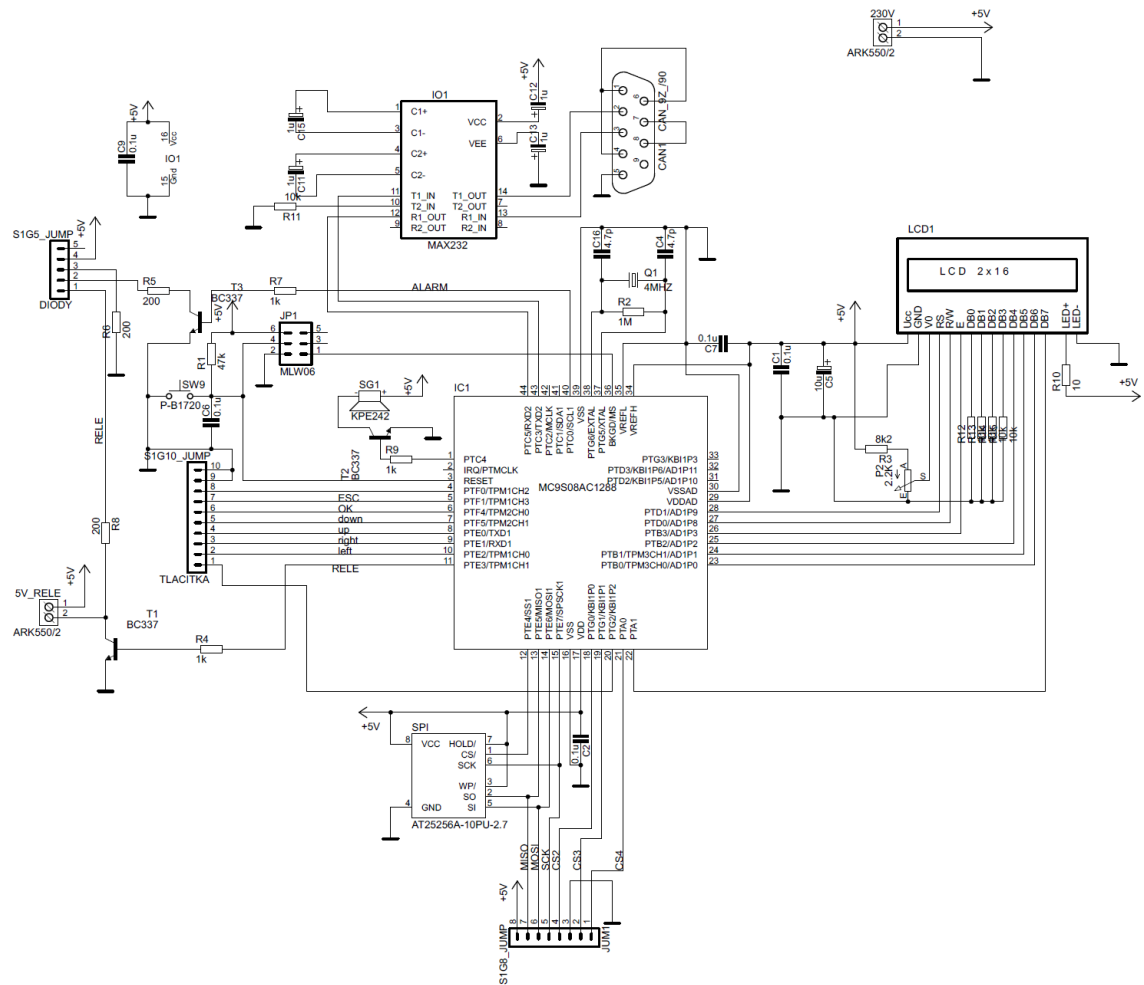
# PŘÍLOHA P I: SCHÉMA ZAPOJENÍ A OSAZOVACÍ PLÁN MĚŘICÍ DESKY



# PŘÍLOHA P II: SCHÉMA ZAPOJENÍ A OSAZOVACÍ PLÁN NAPÁJECÍ DESKY



# PŘÍLOHA P III: SCHÉMA ZAPOJENÍ A OSAZOVACÍ PLÁN ŘÍDÍCÍ DESKY





## PŘÍLOHA P IV: SEZNAM POUŽITÝCH SOUČÁSTEK

| Typ součástky   | Označení součástky     | Výrobce                   |
|---|------------------------|---------------------------|
| Procesor  | MC9S08AC128CFGE        | FREESCALE                 |
| A/D převodník   | AD MCP3551-E/MS        | MICROCHIP                 |
| Paměť EEPROM  | AT25256A-10PU-2.7      | ATMEL                     |
| Transformátor   | EI 481 1167 (1x9)      | HAHN                      |
| Budič sériové linky   | MAX232CPE              | MAXIM                     |
| Displej   | CM160224SFAYA-I1       | DATA IMAGE CO.            |
| Usměrňovač  | B380C1000DIL           | YANGJIE                   |
| Stabilizátor  | LM2940CT-5             | NATIONAL<br>SEMICONDUCTOR |
| Stabilizátor  | MC33269DT-3.3 SMD DPAK | MOTOROLA                  |
| Piezeelektrický buzzer  | KPE242                 | KINGSTATE                 |
| Krystal   | QM 4.000MHZ            | FRONTER                   |
| Polovodičové relé   | RS1A23D25              | CARLO GAVAZZI             |
| NPN tranzistor  | BC337-16               | YANGJIE                   |
| <b>Dále byly použity další součástky, které však není nutno specifikovat<br/>(tlačítka, LED diody, pojistky, konektory, svorkovnice, dutinkové lišty,<br/>oboustranné kolíky a pasivní součástky)</b> |                        |                           |

## PŘÍLOHA P V: FOTODOKUMENTACE

