

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ  
KATEDRA ŘÍDICÍ TECHNIKY



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Regulace teploty



Praha, 2008

Autor: Petr Jonáš

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne 12. 5. 2008

Petr Janda  
.....  
podpis

Katedra řídicí techniky

Školní rok: 2006/2007

## Zadání bakalářské práce

Student: Petr Jonáš

Obor: Kybernetika a měření

Název tématu: Regulace teploty

### Zásady pro výpracování:

1. Seznamte se s regulátorem teploty E5CK Omron.
2. Navrhněte a realizujte model tepelné soustavy.
3. Navrhněte a realizujte řízení této soustavy s využitím regulátoru E5CK.
4. Chování regulačního obvodu ověřte pomocí simulací a experimentů.

**Seznam odborné literatury:** Dodá vedoucí práce

**Vedoucí bakalářské práce:** Doc. Ing. Antonín Stříbrský, CSc.

**Datum zadání bakalářské práce:** zimní semestr 2006/07

**Termín odevzdání bakalářské práce:** 15. 8. 2007

Prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.  
vedoucí katedry



Prof. Ing. Zbyněk Škvor, CSc.  
děkan

## **Poděkování**

Rád bych na tomto místě poděkoval Doc. Ing. Antonínu Stříbrskému, CSc. za vedení bakalářské práce a především za přínosné rady a konzultace. Dále pak děkuji všem, kteří mě při tvorbě této práce podporovali.

## Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá realizací systému pro zpětnovazební regulaci teploty. První část je zaměřena na návrh, realizaci a identifikaci fyzického modelu tepelné soustavy. Tento model se skládá z elektrického ohřevu, systému chlazení (řízení větráčku) a snímače teploty. Model tepelné soustavy je MIMO systém, který musí být podstatně zjednodušen. Přenosové funkce z napájecího napětí ohřevu a z napětí chlazení na měřenou teplotu byly využity pro teoretický návrh PID regulátorů pro ohřev a chlazení. Byla zde aplikována metoda návrhu pomocí geometrického místa kořenů a seřízení regulátoru z přechodové charakteristiky. Reálný model tepelné soustavy je ve skutečnosti řízen číslicovým regulátorem E5CK od firmy Omron. Tento moderní zpětnovazební regulátor je schopen řídit nezávislý systém ohřevu nebo systém ohřevu společně se systémem chlazení, protože obsahuje dva řídicí výstupy pro dvě akční veličiny.

Výsledkem práce, která je zde předložena, je reálný regulační proces, který bude využit v některých předmětech (Instrumentace procesů nebo Základy řízení) vyučovaných na katedře řídicí techniky Českého vysokého učení technického v Praze.

## Annotation

This bachelor thesis deals with the system realization for feedback temperature control. The first part is focused on design, implementation and identification of the physical model of the heating system. This model consists of the electrical heating, cooling system (controlling the fan) and temperature sensor. The model of the heating system is MIMO system which must be greatly simplified. The transfer functions from the heating voltage and cooling voltage to the measured temperature have been used for theoretical design of PID controllers for heating and cooling. There has been applied the Root-Locus design method and controller setting from the step response in this thesis. Real model of the heat system has been controlled in reality by the digital controller E5CK from Omron company. This modern feedback controller is able to control independent heating system or heating system together with cooling system, because it contains two control outputs for two manipulated variables.

Result of the work presented here has been the real regulating process that will be used in some courses (such as Instrumentation of Processes or Principles of Control) taught in the Department of Control Engineering at Czech Technical University in Prague.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>1</b>
1.1	Rozbor cílů bakalářské práce . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Tepelná soustava</b>	<b>4</b>
2.1	Návrh a realizace tepelné soustavy . . . . .	4
2.1.1	Kryt soustavy . . . . .	4
2.1.2	Návrh a realizace ohřevu . . . . .	4
2.1.3	Návrh a realizace chlazení . . . . .	6
2.1.4	Výběr teplotního čidla . . . . .	7
2.1.5	Celkový náhled na navrženou tepelnou soustavu . . . . .	12
2.2	Nalezení matematického popisu systému tepelné soustavy . . . . .	13
2.2.1	Matematický popis vzhledem k OHŘEVU soustavy . . . . .	13
2.2.2	Matematický popis vzhledem k CHLAZENÍ soustavy . . . . .	19
2.3	Experimentální identifikace tepelné soustavy . . . . .	20
2.3.1	Experimentální identifikace OHŘEVU . . . . .	20
2.3.2	Experimentální identifikace CHLAZENÍ . . . . .	22
2.4	Shrnutí vlastností tepelné soustavy . . . . .	23
<b>3</b>	<b>Regulátor E5CK Omron</b>	<b>26</b>
3.1	Vlastnosti regulátoru a jeho příprava . . . . .	26
3.1.1	Programovatelné přiřazení výstupů a nastavení vstupu . . . . .	28
3.1.2	Princip kvazispojité regulace . . . . .	28
3.1.3	Zapojení svorkovnice regulátoru . . . . .	29
3.2	Základní ovládání regulátoru . . . . .	30
3.3	Popis vybraných úrovní a parametrů regulátoru . . . . .	32
3.3.1	Význam speciálního módu - Manuální mód . . . . .	32
3.3.2	Význam speciálního módu - Ochranný mód . . . . .	32
3.3.3	Význam podstatných parametrů - Úroveň 0 . . . . .	32
3.3.4	Význam podstatných parametrů - Úroveň 1 . . . . .	33
3.3.5	Význam podstatných parametrů - Úroveň 2 . . . . .	35
3.3.6	Význam podstatných parametrů - Mód nastavení . . . . .	36
3.3.7	Význam podstatných parametrů - Expanzní mód . . . . .	37

<b>4 Návrh a realizace řízení</b>	<b>38</b>
4.1 Algoritmus ústředního členu regulátoru E5CK . . . . .	39
4.2 Návrh regulátoru pro ohřev . . . . .	42
4.2.1 Seřízení regulátoru z průběhu přechodové charakteristiky . . . . .	42
4.2.2 Návrh regulátoru pomocí geometrického místa kořenů . . . . .	45
4.3 Návrh regulátoru pro ohřev a chlazení . . . . .	47
4.4 Celkový pohled na realizovaný regulační obvod . . . . .	51
<b>5 Doplňkové experimenty s regulačním obvodem</b>	<b>52</b>
5.1 Test autotuningu regulátoru E5CK . . . . .	52
5.2 Testování vlivu poruchy . . . . .	53
5.3 Experimenty s P regulátorem . . . . .	53
<b>6 Závěr</b>	<b>55</b>
Literatura	58
<b>A Obsah přiloženého CD</b>	<b>59</b>

# Kapitola 1

## Úvod

Regulace teploty je asi jednou z nejčastějších regulačních úloh, se kterou je možné se setkat v průmyslové praxi ale i běžném životě. Může se jednat například o řízení jednoduchých systémů jakými jsou různé obdoby elektrické trouby, sporáků nebo žehliček, kde velmi často k udržování žádané hodnoty vystačí obyčejný dvoupolohový regulátor s hysterezí - termostat. Zde si uživatel klade podstatně nižší nároky na průběh regulované veličiny (tj. teploty) a je v podstatě smířený s tím, že tento způsob řízení nevede k ustálenému stavu (regulovaná teplota neustále kmitá kolem žádané hodnoty).

Stejně tak často se můžeme setkat s procesy, které naopak vysokou kvalitu regulace vyžadují a důkladné a přesné řízení je nutné k jejich správnému a bezpečnému chodu. Mezi takové zástupce patří například průmyslové pece, systémy pro solární vytápění, systémy pro regulaci teploty v moderních budovách nebo i takový plastikářský lis z obrázku 1.1 (obrázek převzat z [6]), kde je požadována velmi přesná regulace teploty hned v několika zónách zároveň.

Ať už ale budeme chtít řídit tepelné soustavy jednoduché či více komplikované, je nutné hned v úvodu zmínit jednu jejich typickou a pro návrh řízení velmi důležitou vlastnost. Charakteristikou vlastností tepelných soustav je totiž tzv. **nesymetrická dynamika**. To znamená, že tyto soustavy vykazují jiný časový průběh výstupu při ohřevu a jiný při chlazení. A je jedno, zda se jedná o chladnutí samovolné nebo o chlazení výkonově řízené (např. pomocí větráku).

Jednoduchým příkladem tepelné soustavy s velkou nesymetrií v dynamice topení a chlazení může být například i rychlovarná konvice. Ohřev vody trvá výrazně kratší dobu než vychladnutí na původní teplotu. U jiného typu tepelné soustavy může být zase například rychlejší fáze chlazení oproti topení. Obecně totiž záleží na velikosti topného výkonu oproti výkonu chladícímu. V reálných případech potom velmi často ani nelze



Obrázek 1.1: Plastikářský lis

dosáhnout stejné intenzity chlazení jako topení. Nesymetrická dynamika se pak stává poměrně nepříjemnou vlastností, která mnohdy značně komplikuje návrh regulátorů pro řízení tepelných soustav.

## 1.1 Rozbor cílů bakalářské práce

Jedním z hlavních úkolů této práce je navrhnout a zrealizovat fyzický model tepelné soustavy a pro ten následně vytvořit řízení s využitím regulátoru E5CK od firmy Omron.

Regulátor E5CK (na obrázku 1.2) je moderní číslicový kompaktní regulátor, jehož univerzálnost jak na straně vstupních obvodů (je možné připojit široké množství typů snímačů), tak na straně výstupních obvodů (lze si vybrat z několika typů výstupních = akčních modulů), umožňuje řízení nejrůznějších typů soustav. Nejčastěji se ale využívá právě k regulaci teploty. Je to dáno především tím, že jeho výstupní obvody jsou uzpůsobeny nejen pro jednu akční veličinu (topení), ale je možno využít jeho 2 akční výstupy (tj. pro regulaci ohřevu i chlazení). Jelikož je ale tento regulátor od výrobce nastaven na implicitní hodnoty a připraven pro tzv. "nejčastěji používaný systém", bude nejprve nutné ho, stejně jako v technické praxi, před začleněním do regulačního obvodu s tepelnou soustavou nejprve nakonfigurovat pro tento typ systému.



Obrázek 1.2: Číslicový regulátor E5CK od firmy Omron

Samotnému nastavování tohoto regulátoru však bude předcházet poměrně zdlouhavá cesta nalezení matematického modelu navržené tepelné soustavy a její následná identifikace (tj. určení neznámých parametrů matematického modelu). I když dnešní výrobci často tvrdí, že jsou jejich regulátory vybaveny funkcemi autotuning (automatické naladění) a selftuning<sup>1</sup> (samočinné seřizování) a teoretický model řízeného systému již není potřeba, v této práci bude teoretického modelu hojně využito. Matematický model je

<sup>1</sup>Použitý regulátor E5CK funkce autotuning i selftuning nabízí také.

totiž velmi užitečný při počátečním návrhu regulátoru, protože nám umožňuje nasimulovat setrvačnost a odezvu celého systému (tj. uzavřeného regulačního obvodu) a případně také chování a velikosti akčních veličin (topení/chlazení). Simulace řízeného systému je užitečná také z hlediska bezpečnosti, neboť při ní nerozdíl od reálného experimentu nehrozí žádná havárie. Otázkou však zůstává, do jaké míry se tento matematický model shoduje se skutečným řízeným systémem, v tomto případě tepelnou soustavou.

Po získání matematického popisu soustavy se teprve provede návrh lineárního regulátoru, tj. určení stavitelných parametrů regulátoru E5CK. Tako nastavený regulátor se poté aplikuje na reálný systém tepelné soustavy a následně se ověří správnost matematického modelu porovnáním simulace s reálným procesem. V závěru práce budou provedeny další experimenty s reálným procesem.

Jednotlivé úkoly, které budou realizovány v rámci této práce, by se tedy daly shrnout do těchto několika dílčích kroků:

- Návrh a realizace teplé soustavy
- Nalezení matematického popisu tohoto systému
- Identifikace tepelné soustavy
- Konfigurace regulátoru E5CK před připojením k řízené soustavě
- Návrh regulátoru a jeho následná realizace prostřednictvím stavitelných parametrů regulátoru E5CK
- Porovnávání reálného regulačního obvodu se simulacemi regulační smyčky
- Další experimenty s reálným regulačním obvodem

# Kapitola 2

## Tepelná soustava

### 2.1 Návrh a realizace tepelné soustavy

Jak již bylo naznačeno v kapitole 1.1, regulátor E5CK, který bude k dispozici pro řízení navrhované tepelné soustavy, nabízí regulaci pomocí 2 akční výstupů. Proto bude velmi výhodné této možnosti využít a navrhnout tepelnou soustavu s regulací ohřevu i chlazení. Soustava bude mít tedy 2 řízené vstupy - ohřev a chlazení, přičemž ohřev teplotu pouze zvyšuje a chlazení pouze snižuje. Výstupem bude regulovaná teplota v jednom zvoleném místě uvnitř soustavy.

Nepsaným požadavkem na tuto tepelnou soustavu pak jistě také bude zaručení rozumné spotřeby elektrické energie při zachování poměrně vysoké maximální ustálené teploty.

V dalších odstavcích budou postupně rozepsány jednotlivé součásti realizované tepelné soustavy.

#### 2.1.1 Kryt soustavy

Vnější kryt tepelné soustavy byl zvolen z umělé hmoty. Jedná se o krabičku ve tvaru kvádru o rozměrech 90 x 149 x 178 mm (výška x šířka x délka), která se skládá ze 4 dílů a je možné ji sešroubovat pomocí čtyř samořezných vrutů. Na horní straně krabičky se nachází úzké drážky pro odvětrávání, jinak je celá pevně uzavřena. To je výhodné z toho důvodu, že nebude docházet ke zbytečným tepelným ztrátám. Teplotní odolnost materiálu beze změny jeho tvaru je 85 °C, což pro účely této práce bohatě dostačuje.

#### 2.1.2 Návrh a realizace ohřevu

Abychom mohli ohřev bezproblémově řídit pomocí číslicového regulátoru E5CK, který byl pro tuto úlohu poskytnut, bude nejjednodušší způsob vytváření tepla pomocí přeměny z elektrické energie. Teplo získané přeměnou elektrické energie se pak nazývá teplem elektrickým.

Dle informací uvedených v [7] se nejčastěji využívají tyto způsoby elektrického ohřevu:

- odporový ohřev
- obloukový ohřev
- indukční ohřev
- dielektrický ohřev
- infračervený ohřev

Z hlediska pozdějšího získávání matematického popisu modelu tepelné soustavy bude nevhodnější použít **ohřev odporový**. S tímto způsobem ohřevu je také možné se často setkat v podobě různých topných rezistorů a odporových pecí. Pro lepší umístění zvoleného teplotního čidla (viz. 2.1.4) a také lepší možnosti chlazení (viz. 2.1.3) bude výhodné průchodem elektrického proudu nezahřívat pouze samotné pouzdro topného rezistoru, ale také ohřívat nějaký vhodný kovový materiál. Tento způsob ohřevu potom bývá označován jako nepřímý odporový ohřev.

Jako topné rezistory byly vybrány 2 sériově spojené sypané drátové rezistory ( $2 \times 10 \Omega$ , maximální zatížení 25 W) o rozměrech  $27 \times 14 \times 14$  mm. Ty pak ohřívají hliníkový bloček ve tvaru písmene "L". Tento kus hliníku je pak společně s umělohmotnou podložkou přišroubován doprostřed krabičky tepelné soustavy. Tato část tvořící ohřev soustavy je zachycena na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Topné rezistory připevněné na hliníkovém bločku

Při tomto způsobu přeměny elektrické energie se tedy všechna elektrická práce vynaložená k průchodu proudu vodičem mění v teplo. Teplu vyvinutému průchodem elektrického proudu vodičem říkáme Joulov - Lencovo тепло. Pro toto vzniklé teplo (tj. tepelnou energii = vynaloženou práci) platí:

$$Q_J = W = UIt \quad (J; V, A, s) \quad (2.1)$$

Vztah 2.1 se nazývá Joulov-Lenzův zákon. Pokud víme, že máme pro elektrický ohřev k dispozici zdroj napětí  $U = 12$  V, potom můžeme stanovit proudový odběr při trvale připojeném zdroji a také výkon jednoho topného rezistoru.

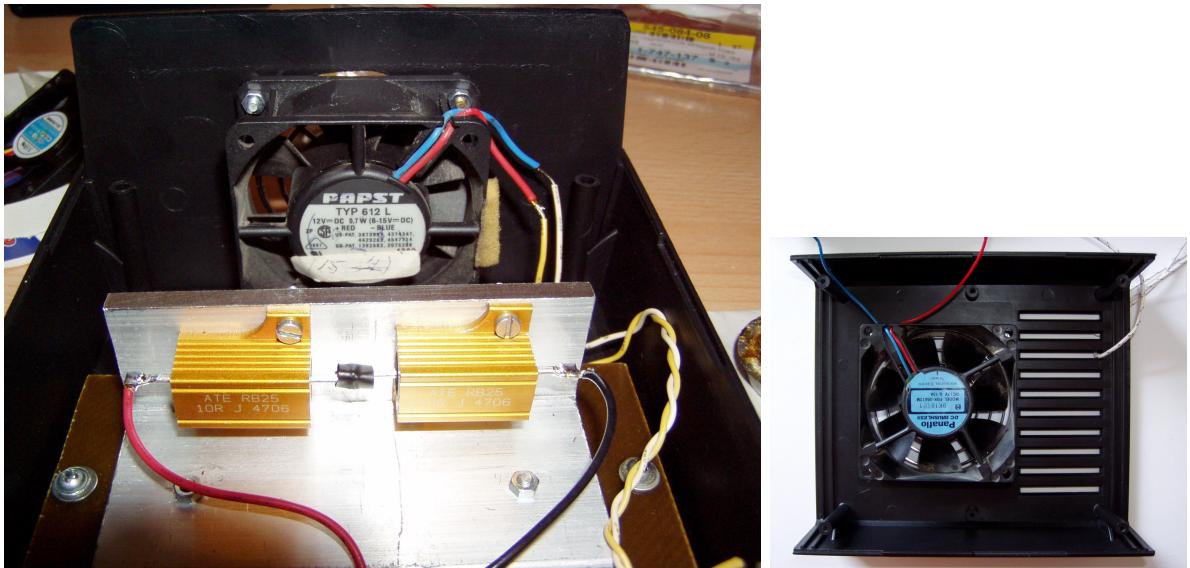
$$I = \frac{U}{R_1 + R_2} = \frac{12}{10 + 10} = 0,6 \text{ A} \quad (2.2)$$

$$P_{1,2} = UI = \frac{U^2}{R_{1,2}} = R_{1,2} \cdot I^2 = 10 \cdot 0,6^2 = 3,6 \text{ W} \quad (2.3)$$

Celkový výkon ohřevu tedy bude 7,2 W. Tím je zaručena poměrně nízká spotřeba a přitom je možno dosáhnout maximální ustálené teploty hliníkového bločku až 57 °C. Ohřev tepelné soustavy bude řízen výstupem OUT1 regulátoru E5CK.

### 2.1.3 Návrh a realizace chlazení

Pro regulaci pomocí chlazení byl vybrán malý větráček (60 x 60 x 15 mm), napájecí napětí 12 V DC, příkon 0,7 W. Větráček je umístěn na zadní stěně plastové krabičky a nasměrován tak, aby mohl ochlazovat svislou plochu ohřívaného hliníkového tělesa, na které jsou umístěny topné rezistory (viz. obrázek 2.2a). Tento větráček bude řízen druhým výstupem regulátoru (OUT2).



Obrázek 2.2: a) Malý větráček pro regulaci chlazení, b) Velký pomocný větrák

Pro rychlé ochlazení je ještě v soustavě umístěn velký pomocný větrák (80 x 80 x 25 mm), který ochlazuje hliníkový blok shora. Je upevněn na spodní straně horního zaklapovacího víka soustavy (viz. obrázek 2.2b) a lze ho maximálně zatížit 12 V DC a 0,115 A. Toto pomocné ochlazování ovšem není přímou součástí regulačního obvodu. Bude ale sloužit jako testovací poruchová veličina regulačního obvodu.

## 2.1.4 Výběr teplotního čidla

Teplota je opravdu jednou z nejčastěji snímaných a vyhodnocovaných veličin a proto v dnešní době existuje celá škála způsobů jejího měření. Dle způsobu měření by ale mělo být možné všechny senzory teploty začlenit do jedné ze dvou základních skupin. Jedná se o kontaktní a bezkontaktní měření teploty. I když je způsob bezkontaktního měření stále více využíván, přesto se častěji setkáme s dotykovým měřením teploty, na které se proto nyní více zaměříme. V této části se bude částečně vycházet z literatury [4].

Pro kontaktní elektrické měření teploty se nejvíce používají tyto druhy senzorů:

- termoelektrické
- odporové kovové<sup>2</sup> (např. Pt100, Pt1000, Ni100, Ni1000 ...)
- odporové polovodičové (termistory NTC a PTC)
- polovodivé s PN přechodem
- krystalové

První dva zmíněné typy senzorů v průmyslu naprosto převládají a jsou také plně podporovány regulátorem E5CK (konkrétně termočlánky typu K, J, T, E, N, R, S, B a čidlo Pt100). Proto se nyní při výběru senzoru zaměříme konkrétně na tyto 2 zástupce. V tabulce 2.1 je uvedeno porovnání jejich vlastností.

	termočlánek	odporový kovový snímač
teplotní rozsah [°C]	-200..2300	-200..850
citlivost	velmi malá	malá
linearita	špatná	dobrá
rychllosť odezvy	velmi dobrá	dobrá
odolnost	velmi dobrá	nízká
cena	nižší	vyšší

Tabulka 2.1: Porovnání vlastností termočlánků a odporových kovových senzorů

### Termoelektrické senzory teploty

Termoelektrické články (termočlánky) využívají k měření teploty tzv. Seebeckova termoelektrického jevu, podle kterého vzniká mezi vývody termočlánku složeného ze dvou různých kovů termoelektrické napětí. Toto napětí je úměrné rozdílu teploty  $\vartheta_M$  v místě spojení kovové dvojice a teploty  $\vartheta_S$  srovnávacího (“studeného”) konce termočlánku.

<sup>2</sup>označované jako RTD = Resistive Temperature Detectors

Platí tedy:

$$U = \alpha (\vartheta_M - \vartheta_S) \quad (2.4)$$

kde  $\alpha$  je termoelektrický koeficient použité dvojice kovů.

Vztah 2.4 je zjednodušený vztah určený pro běžná měření teploty. Přesná závislost termoelektrického napětí na teplotě by byla vyjádřena polynomem 2. nebo 3. řádu.

Podstatnou nevýhodou tohoto senzoru je kromě uvedené velmi malé citlivosti (napětí  $U$  se mění v závislosti na měřené teplotě rádově pouze v  $\mu\text{V}$  až  $\text{mV}$ ) a nelinearity charakteristiky také nutnost udržovat teplotu  $\vartheta_S$  srovnávacího konce na konstantní a předem známé hodnotě. K tomu se využívá různých způsobů kompenzací - např. kompenzační můstek, umístění srovnávacích konců do termostatu, izotermická svorkovnice a další.

Přestože regulátor E5CK umožňuje zpracovat signál z několika typů termočlánků, byl nakonec jako měřicí člen zvolen odporový senzor teploty - viz. následující odstavec.

## Odporové kovové senzory teploty (čidlo Pt100)

Odporové senzory teploty k měření využívají závislosti elektrického odporu daného kovového materiálu na teplotě. Jejich ohromnou výhodou je právě jejich linearita, kterou lze vyjádřit pomocí zjednodušeného vztahu:

$$R_\vartheta = R_0(1 + \alpha \cdot \vartheta) \quad (2.5)$$

kde  $\alpha$  je teplotní součinitel odporu,  $R_0$  je odpor materiálu při teplotě 0 °C a  $\vartheta$  je měřená teplota.

V praxi se nejvíce používají platinové senzory Pt100, jejichž odpor  $R_0$  je při 0 °C roven 100 Ω. Dále se vyrábějí senzory Pt1000, Pt500 či niklové Ni100 a Ni1000. Jelikož je ale regulátor E5CK uzpůsoben pro připojení čidla Pt100, byl pro měření teploty vybrán právě tento konkrétní senzor. Pro rozsah od -200 °C do 850 platí pro Pt100 následující vztah závislosti jeho odporu na měřené teplotě:

$$R_\vartheta = R_0 [1 + A\vartheta + B\vartheta^2 + C\vartheta^3 (\vartheta - 100)] \quad (2.6)$$

kde

$$R_0 = 100 \Omega$$

$$A = 3,90802 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

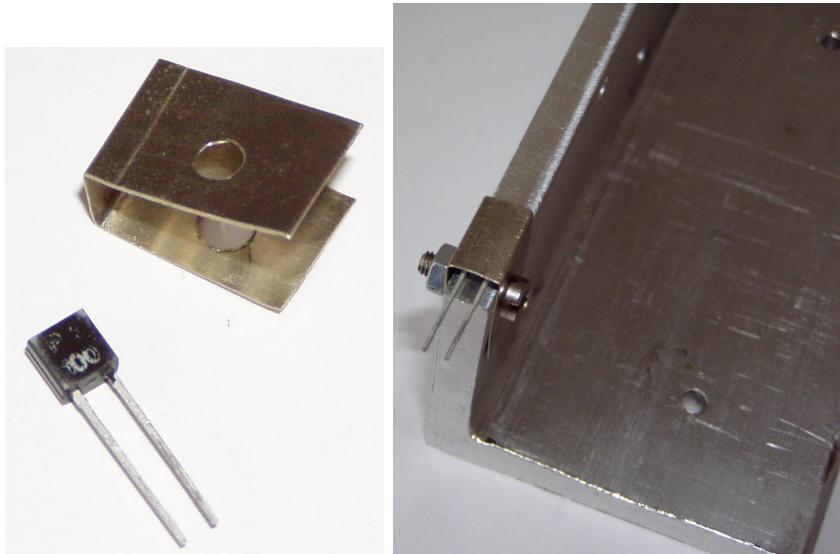
$$B = 5,802 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$$

$$C = -4,2735 \cdot 10^{-12} \text{ K}^{-3} \quad \text{pro } \vartheta > 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$C = 0 \quad \text{pro } \vartheta < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Přestože se jeví vztah 2.6 jako nelineární, je možné ho stále považovat za téměř lineární, neboť členy s konstantami  $B$  a  $C$  jsou rádově natolik malé, že linearitu ovlivní jen nepatrně.

Konkrétní zvolené platinové čidlo Pt100 má teplotní rozsah od  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , patří do toleranční třídy B a jeho výstup je normovaný a tudíž regulátorem snadno zpracovatelný. Čidlo je zalito v pouzdře z umělé hmoty (TO 92) a na obrázku 2.3a je zachyceno společně s kovovou krytkou. Na obrázku 2.3b je již čidlo nasazeno na hliníkovém bločku, kde bude měřit regulovanou teplotu.



Obrázek 2.3: a) Čidlo Pt100, b) Pt100 nasazené na hliníkovém bločku

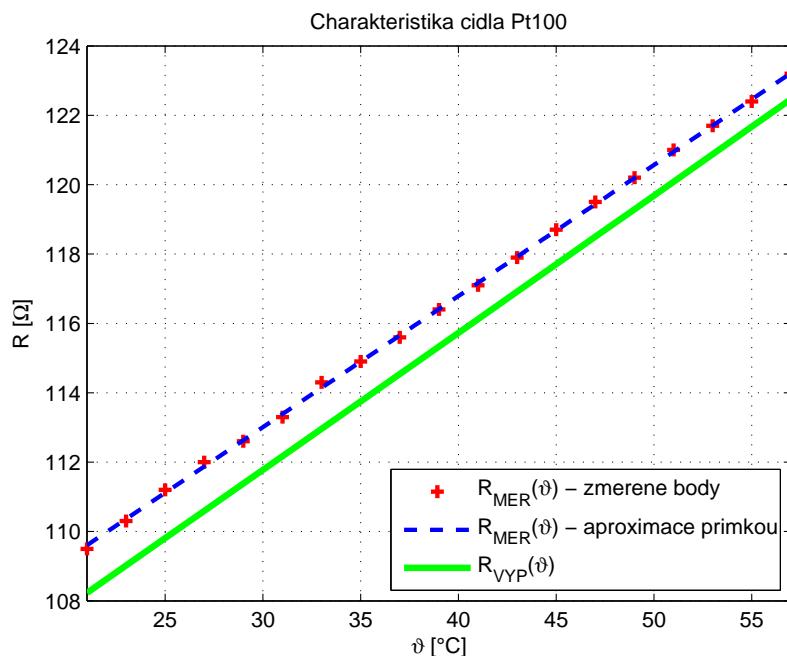
Pomocným referenčním měřením teploty pomocí termočlánku typu K, jehož signál byl zpracován a zobrazen digitálním multimetrem, byla změřena charakteristika použitého čidla Pt100 (tj. závislost odporu platinového senzoru na teplotě). To bylo provedeno v těchto krocích:

1. Referenční termočlánek se přilepil poblíž čidla Pt100.
2. Na topné rezistory se připojilo plné napětí 12 V, čímž se zahájil ohřev hliníkového bločku.
3. Sledovala se vzrůstající teplota měřená referenčním termočlánkem a zobrazovaná na digitálním multimetru a pro tyto hodnoty teplot se zaznamenával odpor  $R_{MER}$  [ $\Omega$ ] čidla Pt100 (měřený dalším multimetrem).

Takto se změřila charakteristika čidla Pt100 pro maximální možný teplotní rozsah navržené tepelné soustavy (od  $21\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $57\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Dále byly také pro tyto teploty dopočítány teoretické hodnoty odporů  $R_{VYP}$  [ $\Omega$ ] podle vztahu 2.6. Naměřené a vypočítané hodnoty jsou zaneseny v tabulce 2.2 a v grafu na obrázku 2.4.

$\vartheta$ [°C]	$R_{MER}$ [ $\Omega$ ]	$R_{VYP}$ [ $\Omega$ ]	$\vartheta$ [°C]	$R_{MER}$ [ $\Omega$ ]	$R_{VYP}$ [ $\Omega$ ]
21	109,5	108,23	41	117,1	116,12
23	110,3	109,02	43	117,9	116,91
25	111,2	109,81	45	118,7	117,71
27	112,0	110,59	47	119,5	118,50
29	112,6	111,38	49	120,2	119,29
31	113,3	112,17	51	121,0	120,08
33	114,3	112,96	53	121,7	120,88
35	114,9	113,75	55	122,4	121,67
37	115,6	114,54	57	123,2	122,47
39	116,4	115,33			

Tabulka 2.2: Převodní tabulka senzoru Pt100 (změřené a vypočítané hodnoty)

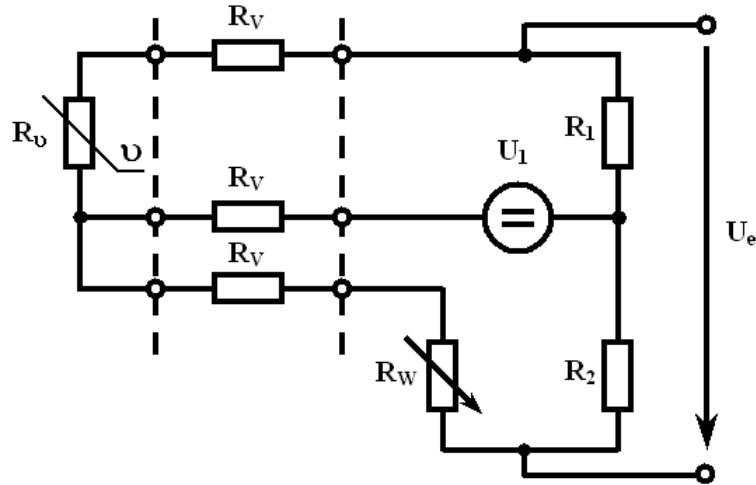


Obrázek 2.4: Změřená a vypočítaná charakteristika čidla Pt100

Z těchto naměřených a zpracovaných hodnot je patrné, že hodnoty měřeného odporu  $R_{MER}$  [ $\Omega$ ] čidla Pt100 jsou zhruba o  $1,1 \Omega$  vyšší než by měly být dle teoretického předpokladu. Tento rozdíl je nejspíš způsoben odporem přívodních vodičů senzoru a především banánkových konektorů přes které je připojen. Tomuto posunu odpovídají přibližně  $3 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Proto bude muset být při zpracování signálu z čidla Pt100 provedena na straně regulátoru E5CK korekce tohoto teplotního offsetu (pomocí parametru “Posun vstupu horního a dolního omezení (teplota)” v kapitole 3.3.5). Pak budou údaje o regulované teplotě zpracovávané regulátorem odpovídat správné a skutečné teplotě vyhřívaného

tělesa.

Při používání odporového senzoru teploty Pt100 je také velmi důležité zabránit změnám teploty přívodních vodičů. K odporu snímače se totiž ještě musí připočítat odpor vedení a ten by se mohl měnit se změnou okolní teploty. K tomuto účelu se proto používá tzv. **třívodičové zapojení** (použito z [10]). Výhody tohoto zapojení je možno vysvětlit pomocí schématu na obrázku 2.5, kde je odpor  $R_v$  senzoru Pt100 součástí odporového kompenzačního můstku, jehož výstupem je napětí  $U_e$  (symbolicky označené jako regulační odchylka).



Obrázek 2.5: Zapojení odporového můstku s čidlem Pt100 v třívodičovém zapojení

Odpor  $R_W$  slouží pro vyvážení můstku (představuje "žádanou hodnotu"). Od můstku jsou k čidlu vyvedeny vodiče, jejichž odpor  $R_V$  by se mohl vlivem změny okolní teploty měnit a rozvažovat tak můstek. Zásluhou třetího vodiče vedeného od napájení můstku  $U_1$  ale nakonec odpory  $R_V$  výstupní napětí můstku nijak neovlivní. To dokazují následující vztahy pro podmínu rovnováhy můstku.

$$(R_v + R_V) \cdot R_2 = (R_W + R_V) \cdot R_1 \quad (2.7)$$

Pokud budeme uvažovat  $R_1 = R_2$ , pak bude platit

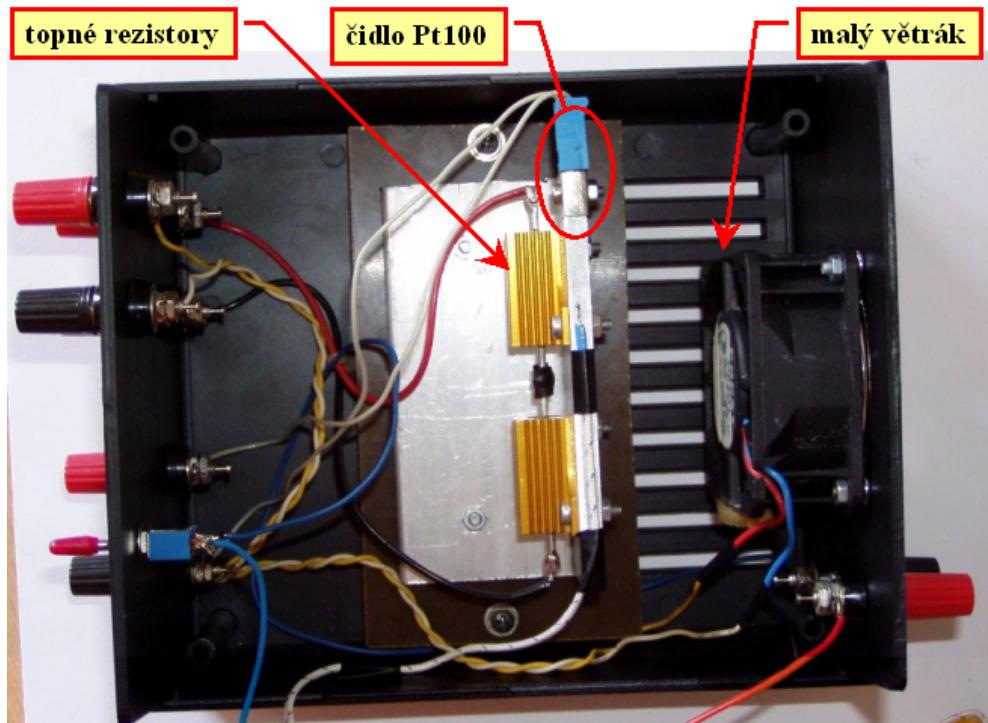
$$R_v = R_W \quad (2.8)$$

a odpory vedení  $R_V$  již do podmínky rovnováhy můstku nijak nezasahuje.

Svorkovnice regulátoru E5CK je pro třívodičové připojení senzoru Pt100 také uzpůsobena a regulátor tento způsob zapojení přímo vyžaduje.

## 2.1.5 Celkový náhled na navrženou tepelnou soustavu

Zde jsou všechny součásti navržené tepelné soustavy popsané v předchozích odstavcích přehledně zobrazeny v celkovém provedení - viz. obrázek 2.6.



Obrázek 2.6: Vnitřek tepelné soustavy - pohled shora

Protože pomocný "velký" větrák, který je umístěn na horním víku soustavy a ochlazuje hliníkový blok shora, není řízen pomocí regulátoru, je možné ho ovládat pouze pomocí vypínače z předního panelu soustavy (viz. obrázek 2.7).



Obrázek 2.7: Přední panel tepelné soustavy

## 2.2 Nalezení matematického popisu systému tepelné soustavy

Tepelná soustava byla navržena jako systém se 2 vstupy (ohřev a chlazení) a 1 výstupem (regulovaná teplota vyhřívaného tělesa). Jedná se tedy o systém označovaný jako MIMO<sup>3</sup>. Jelikož ale předem víme, že na soustavu bude v jednom okamžiku působit vždy pouze jeden ze vstupů (pouze ohřev nebo pouze chlazení) a na regulátoru si lze zvolit mezi regulací pomocí samotného ohřevu (výstup OUT1) a regulací s ohřevem i chlazením (výstupy OUT1 a OUT2), je možné si pro zjednodušení hledání matematického popisu rozdělit analýzu chování systému na část zabývající se ohřevem a zvlášť na část popisující chlazení.

### 2.2.1 Matematický popis vzhledem k OHŘEVU soustavy

Hned v úvodu analýzy ohřevu tepelné soustavy je nutné zmínit, že tepelné systémy patří mezi typické zástupce soustav s rozprostřenými parametry. Je to dáné tím, že šíření tepla bývá velmi často popsáno parciálními diferenciálními rovnicemi. Takový model však ale nelze použít pro návrh řízení. Proto bude nutné tepelný systém silně zjednodušit a modelovat jej jako tepelný obvod sestavený z prvků se soustředěnými parametry (teplý rezistor a tepelný kapacitor). Tím je myšleno, že žádný parametr ani veličina nebudou závislé na nějaké prostorové proměnné.

Pro tepelné systémy je možné hledat analogii v elektrických systémech, kde napětí  $u$  bude odpovídat teplota  $T$  a proud  $i$  tepelný tok  $\Phi$ . Pak je možné tepelné systémy modelovat pomocí tzv. **pseudo-výkonových grafů** (čerpáno z [5]), kde základními prvky jsou:

- tepelný rezistor R
- tepelný kapacitor C
- uzel typu 0 = sériové spojení
- uzel typu 1 = paralelní spojení
- zdroj teploty (označení SE)
- zdroj tepelného toku (označení SF)

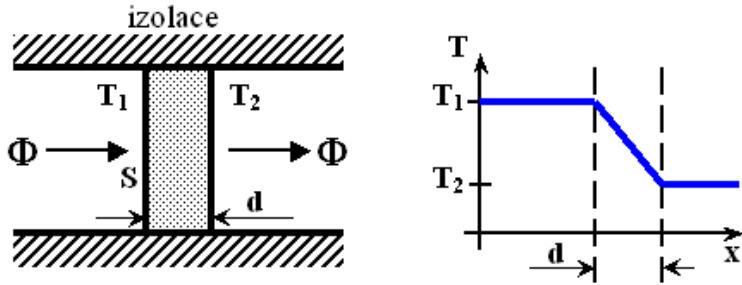
#### Tepelný rezistor

Tepelný rezistor je základním prvkem pseudo-výkonového grafu. Jeho charakteristika a způsob modelování ale souvisí s různými způsoby šíření tepla. Teplo se prostředím šíří třemi základními způsoby: vedením, prouděním a sáláním.

---

<sup>3</sup>Multi-Input Multi-Output systems = systémy s více vstupy či více výstupy

Protože **vedení tepla** je nejčastější způsob šíření tepla v pevných tělesech (což je také případ realizované tepelné soustavy), omezíme se již pouze na tento způsob. Na obrázku 2.8 je naznačen princip tepelného rezistoru, kde uspořádání tepelných stěn umožní šíření tepla pouze ve směru osy x. Ve směru osy y se díky ideální izolaci teplo nešíří. Z průběhu nakresleného na tomto obrázku je patrné, že k tepelným ztrátám dochází pouze na přepážce o tloušťce  $d$  a ploše  $S$ .



Obrázek 2.8: Princip tepelného rezistoru

Pro šíření tepla vedením je pak možné vyjádřit vztah mezi tepelným tokem  $\Phi$  [W] a rozdílem teplot na přepážce:

$$\Phi = \frac{1}{R} (T_1 - T_2) = \Lambda \cdot (T_1 - T_2) \quad (2.9)$$

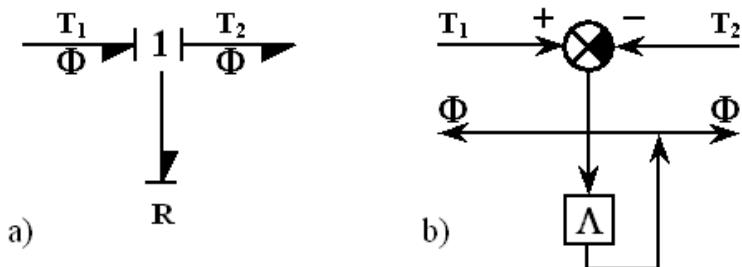
kde  $R$  [ $W^{-1}.K$ ] je tepelný odpor a  $\Lambda$  [ $W.K^{-1}$ ] je tepelná vodivost.

Tepelná vodivost potom bude pro šíření tepla vedením dána vztahem:

$$\Lambda = \lambda \frac{S}{d} \quad (2.10)$$

kde  $\lambda$  [ $W.m^{-1}.K^{-1}$ ] je měrná tepelná vodivost.

Tepelný rezistor je pak možné zakreslit jako prvek pseudo-výkonového grafu - viz. obrázek 2.9a a jako součást simulačního schématu - viz. obrázek 2.9b.



Obrázek 2.9: Tepelný rezistor a) v pseudo-výkonovém grafu, b) v simulačním schématu

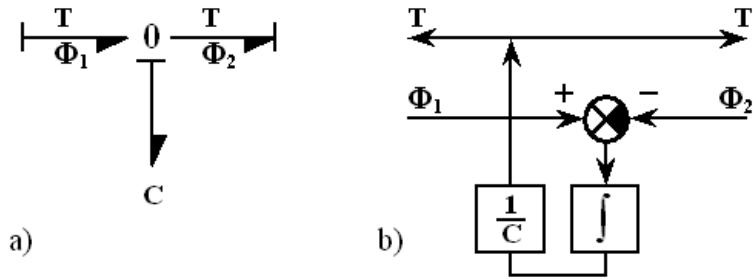
## Tepelný kapacitor

Chování tepelného kapacitoru je možné popsat vztahem:

$$T = \frac{1}{C} \int_0^t \Delta\Phi(\tau) d\tau \quad (2.11)$$

kde  $C$  [ $J.K^{-1}$ ] je tepelná kapacita a  $\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$ .

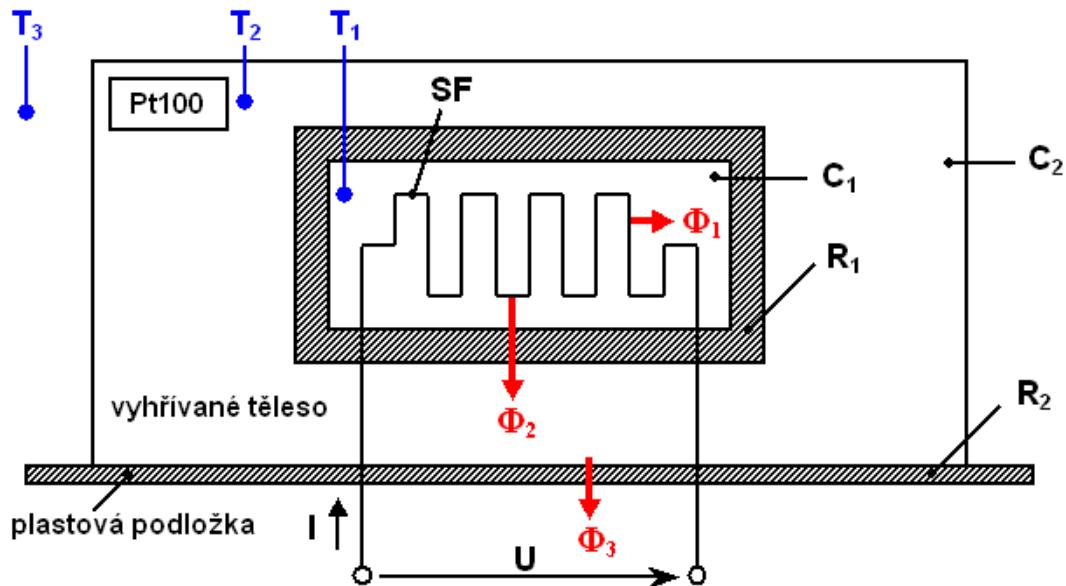
Této rovnici odpovídá nákres tepelného kapacitoru pro pseudo-výkonový graf na obrázku 2.10a a simulační blokové schéma na obrázku 2.10b.



Obrázek 2.10: Tepelný kapacitor a) v pseudo-výkonovém grafu, b) v simulačním schématu

## Elektrotepelny nereverzibilni menič - nalezeni modelu pro ohrev

Nyní se můžeme pokusit namodelovat princip ohřevu realizované tepelné soustavy pomocí elektrotepelneho nereverzibilnho měniče - viz. obrázek 2.11.



Obrázek 2.11: Princip ohřevu navržené tepelné soustavy

Význam teplot uvedených v obrázku 2.11:

$T_1$  ... vnitřní teplota odporu

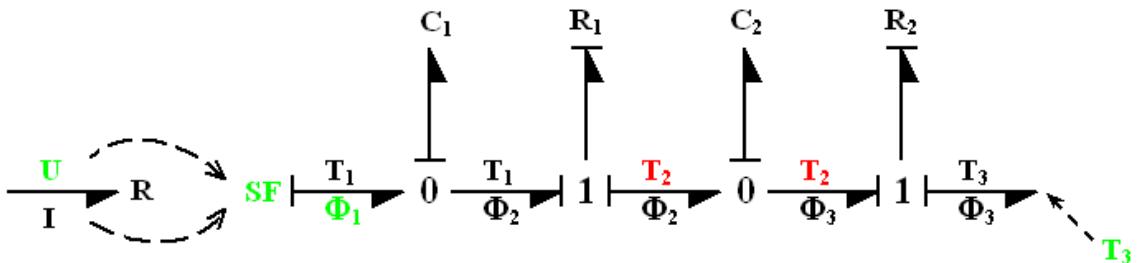
$T_2$  ... teplota vyhřívaného tělesa (tj. hliníkového bločku) měřená čidlem Pt100

$T_3$  ... teplota okolí

Vazbu mezi elektrickým a tepelným systémem zprostředkovává "elektrotepelny" rezistor, který bývá označován jako elektrotepelny nereverzibilní měnič. Rezistor umožní jen jednosměrný přenos výkonu z elektrického obvodu do tepelného. Předpokládá se, že ztrátový výkon  $U \cdot I$  se přemění v tepelný tok  $\Phi_1$ . Rezistor je v tomto případě vlastně zdroj tepelného toku (SF) řízený napětím. Tento tepelný tok se částečně akumuluje v tělese odporu a částečně pronikne z tělesa ven - podle nákresu 2.11 v podobě toku  $\Phi_2$ . Tepelný tok  $\Phi_2$  se poté opět akumuluje v ohřívaném tělese, jehož teplota  $T_2$  je měřena čidlem Pt100, a část se dále emituje do okolí (jako tok  $\Phi_3$ ).

Při realizaci ohřevu byly v tepelné soustavě ve skutečnosti použity 2 topné rezistory, ale to na principu modelování nic nezmění. Dále je vhodné si uvědomit, že se ohmický odpor topných rezistorů mění lineárně s teplotou podle již zmíněného vztahu 2.5. Tato závislost by ale ještě více komplikovala model tepelné soustavy vzhledem k ohřevu, proto zde nebude uvažována.

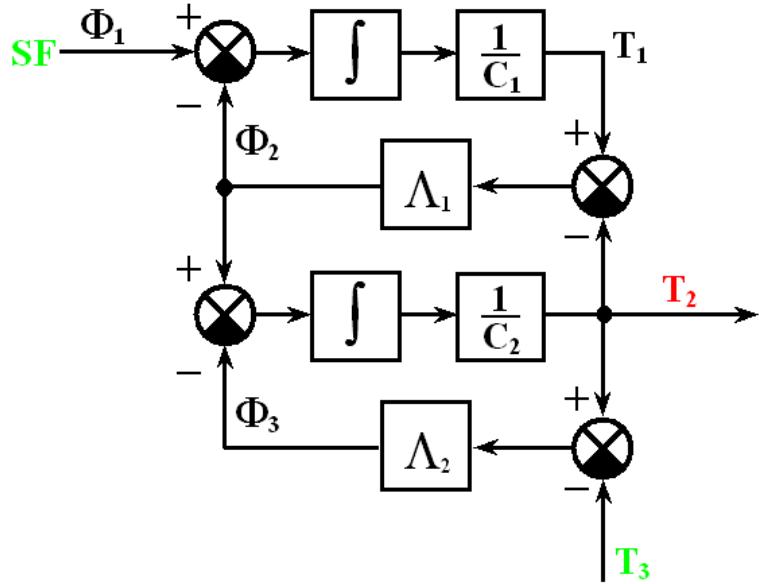
Na základě principiálního náčrtku 2.11 nyní můžeme nakreslit pseudo-výkonový graf použitím již zmiňovaných tepelných kapacit a rezistorů (obrázek 2.12). Z tohoto grafu je navíc patrné, že vstupem do systému není pouze tepelný tok  $\Phi_1$ , který můžeme vyjádřit pomocí napětí  $U$  vztahem  $\Phi_1 = k \cdot U$ , ale i teplota okolí  $T_3$ , která také ovlivňuje stav systému. Výstupní veličinou je měřená teplota  $T_2$ .



Obrázek 2.12: Pseudo-výkonový graf pro ohřev navržené tepelné soustavy

Tepelná část grafu musí být od elektrického systému (rezistor R) oddělena, protože narozdíl od něj nereprezentuje tok výkonu. Součin  $\Phi [W] \cdot T [K]$  totiž nemá rozměr výkonu (ten má už samotný tepelný tok  $\Phi$ ), proto také bývají grafy určené pro modelování tepelných soustav označovány jako pseudo-výkonové, nikoliv jako výkonové.

Díky způsobu kreslení blokových schémat tepelných rezistorů a kapacitorů (obrázky 2.9 a 2.10) můžeme tento pseudo-výkonový graf již překreslit do podoby simulačního stavového schématu pro ohřev tepelné soustavy - viz. obrázek 2.13.



Obrázek 2.13: Simulační schéma ohřevu tepelné soustavy

Z tohoto simulačního schématu můžeme nyní odvodit stavové rovnice modelu tepelné soustavy pro ohřev. Za stavové proměnné zvolíme teploty  $T_1$  a  $T_2$ , vstupem je tepelný tok  $\Phi_1$  (respektive napájecí napětí  $U$ ) a teplota okolí  $T_3$  a výstupem teplota  $T_2$ . Stavový popis tedy bude vyjádřen takto:

$$\begin{aligned}\dot{T}_1 &= -\frac{\Lambda_1}{C_1} \cdot T_1 + \frac{\Lambda_1}{C_1} \cdot T_2 + \frac{k}{C_1} \cdot U \\ \dot{T}_2 &= \frac{\Lambda_1}{C_2} \cdot T_1 - \frac{\Lambda_1}{C_2} \cdot T_2 - \frac{\Lambda_2}{C_2} \cdot T_2 + \frac{\Lambda_2}{C_2} \cdot T_3 \\ y &= T_2\end{aligned}\tag{2.12}$$

Obecně bývají systémy popisovány maticovým stavovým modelem ve tvaru:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{D} \cdot \mathbf{u}(t)\end{aligned}\tag{2.13}$$

kde  $\mathbf{A}$  je matice systému (matice stavů),  $\mathbf{B}$  matice řízení (matice vstupů),  $\mathbf{C}$  výstupní matice a  $\mathbf{D}$  matice vazeb mezi vstupy a výstupy. V našem případě máme tedy tyto matice stavového popisu:

$$\begin{aligned}\mathbf{A} &= \begin{bmatrix} -\frac{\Lambda_1}{C_1} & \frac{\Lambda_1}{C_1} \\ \frac{\Lambda_1}{C_2} & -\frac{\Lambda_1 + \Lambda_2}{C_2} \end{bmatrix} & \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} \frac{k}{C_1} & 0 \\ 0 & \frac{\Lambda_2}{C_2} \end{bmatrix} \\ \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} & \mathbf{D} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix}\end{aligned}$$

Z těchto matic vnitřního stavového popisu systému nyní můžeme získat přenosovou matici soustavy vzhledem k ohřevu pomocí vztahu:

$$\mathbf{P}_{\text{OH}}(s) = \mathbf{C} \cdot (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{B} + \mathbf{D} = \mathbf{C} \cdot \frac{\text{adj}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})}{\det(s\mathbf{I} - \mathbf{A})} \cdot \mathbf{B} + \mathbf{D} \quad (2.14)$$

Postup výpočtu bude tedy následující:

$$s\mathbf{I} - \mathbf{A} = s \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \mathbf{A} = \begin{bmatrix} s + \frac{\Lambda_1}{C_1} & -\frac{\Lambda_1}{C_1} \\ -\frac{\Lambda_1}{C_2} & s + \frac{\Lambda_1 + \Lambda_2}{C_2} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$\Delta = \det(s\mathbf{I} - \mathbf{A}) = \left(s + \frac{\Lambda_1}{C_1}\right) \cdot \left(s + \frac{\Lambda_1 + \Lambda_2}{C_2}\right) - \frac{\Lambda_1^2}{C_1 C_2} \quad (2.16)$$

$$\text{adj}(s\mathbf{I} - \mathbf{A}) = \begin{bmatrix} s + \frac{\Lambda_1 + \Lambda_2}{C_2} & \frac{\Lambda_1}{C_2} \\ \frac{\Lambda_1}{C_1} & s + \frac{\Lambda_1}{C_1} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} s + \frac{\Lambda_1 + \Lambda_2}{C_2} & \frac{\Lambda_1}{C_1} \\ \frac{\Lambda_1}{C_2} & s + \frac{\Lambda_1}{C_1} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{s + \frac{\Lambda_1 + \Lambda_2}{C_2}}{\Delta} & \frac{\frac{\Lambda_1}{C_1}}{\Delta} \\ \frac{\Lambda_1}{C_2} & \frac{s + \frac{\Lambda_1}{C_1}}{\Delta} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$\mathbf{C} \cdot (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{s + \frac{\Lambda_1 + \Lambda_2}{C_2}}{\Delta} & \frac{\frac{\Lambda_1}{C_1}}{\Delta} \\ \frac{\Lambda_1}{C_2} & \frac{s + \frac{\Lambda_1}{C_1}}{\Delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Lambda_1}{C_2} & \frac{s + \frac{\Lambda_1}{C_1}}{\Delta} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$\mathbf{C} \cdot (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\Lambda_1}{C_2} & \frac{s + \frac{\Lambda_1}{C_1}}{\Delta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{k}{C_1} & 0 \\ 0 & \frac{\Lambda_2}{C_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Lambda_1 k}{C_1 C_2} & \frac{\Lambda_2}{C_2} \left(s + \frac{\Lambda_1}{C_1}\right) \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Po dosazení determinantu  $\Delta$  a dalších úpravách matice 2.20 dostáváme výsledný tvar přenosové matice ohřevu tepelné soustavy:

$$\mathbf{P}_{\text{OH}}(s) = \begin{bmatrix} \frac{k}{\frac{C_1 C_2}{\Lambda_1 \Lambda_2} s^2 + \left(\frac{C_1}{\Lambda_1} + \frac{C_1}{\Lambda_2} + \frac{C_2}{\Lambda_2}\right) s + 1} & \frac{\frac{C_1}{\Lambda_1} s + 1}{\frac{C_1 C_2}{\Lambda_1 \Lambda_2} s^2 + \left(\frac{C_1}{\Lambda_1} + \frac{C_1}{\Lambda_2} + \frac{C_2}{\Lambda_2}\right) s + 1} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

První člen matice 2.21 představuje přenosovou funkci z napájecího napětí  $U \equiv U_{OH}$  na měřenou teplotu  $T_2$  a druhý člen představuje přenosovou funkci z teploty okolí  $T_3$  na teplotu  $T_2$ . Takto by se tedy jednalo o systém s dvěma vstupy a jedním výstupem. Zde ale provedeme další zjednodušení a budeme považovat teplotu okolí  $T_3$  za konstantní. Tím se nám počet vstupů systému zredukuje na jeden. Teplotu okolí potom budeme uvažovat jako konstantní poruchu, která se přičítá k výstupu soustavy.

Přenos ohřevu soustavy tedy můžeme napsat ve tvaru:

$$P_{OH}(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{T_2(s)}{U_{OH}(s)} = \frac{\frac{k}{\Lambda_2}}{\frac{C_1 C_2}{\Lambda_1 \Lambda_2} s^2 + \left( \frac{C_1}{\Lambda_1} + \frac{C_1}{\Lambda_2} + \frac{C_2}{\Lambda_2} \right) s + 1} \quad (2.22)$$

Vztah 2.22 je přenos systému druhého řádu, který lze obecně napsat jako:

$$P_{OH}(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{T_2(s)}{U_{OH}(s)} = \frac{k_s}{(1 + A_1 \cdot s)(1 + A_2 \cdot s)} \quad (2.23)$$

Určení neznámých parametrů, tj. statického zesílení  $k_s$  a časových konstant  $A_1$  a  $A_2$ , bude úkolem experimentální identifikace ohřevu tepelné soustavy - viz. kapitola 2.3.1.

## 2.2.2 Matematický popis vzhledem k CHLAZENÍ soustavy

V případě chlazení vyhřívaného tělesa pomocí malého větráčku, na který v určitém čase přivedeme skokem napájecí napětí  $U_{CHL}$ , je možné si vzhledem k matematickému popisu rovnou představit chování takového systému. V zjednodušeném případě je možné toto chování vyjádřit pomocí přenosu:

$$P_{CHL}(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{T_2(s)}{U_{CHL}(s)} = \frac{k_s}{\tau \cdot s + 1} ; \quad k_s < 0 \quad (2.24)$$

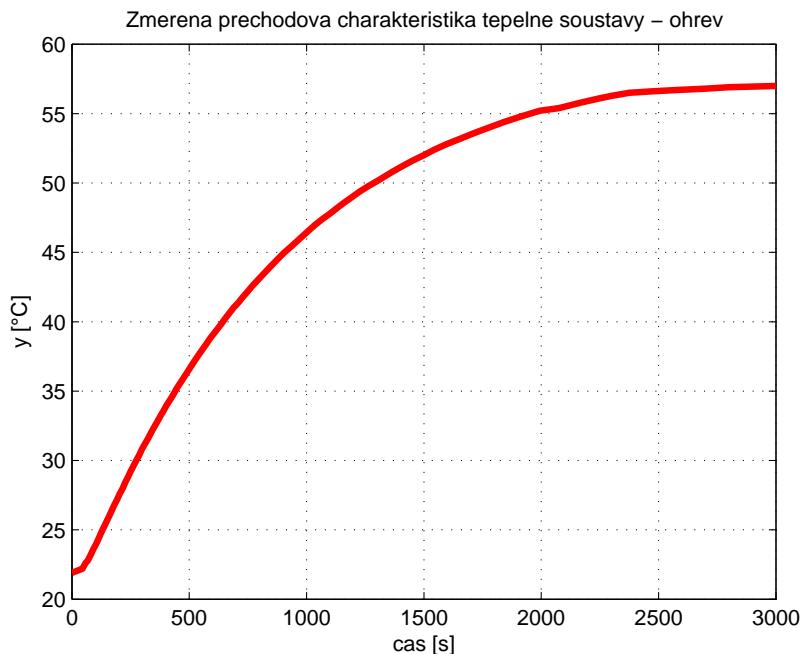
Jedná se o tedy o systém 1. řádu, jehož přechodovou charakteristikou je pro chlazení typická klesající exponenciála (výstup se bude z počáteční hodnoty při skokové změně vstupu exponenciálně snižovat). Výstupem  $y$  je opět teplota  $T_2$  měřená ze stejného místa čidlem Pt100 jako při ohřevu soustavy. Úkolem experimentální identifikace chlazení systému potom bude nalezení časové konstanty  $\tau$  a zesílení  $k_s$  - viz. kapitola 2.3.2.

## 2.3 Experimentální identifikace tepelné soustavy

Cílem experimentální identifikace tepelné soustavy je naměřit přechodové charakteristiky ohřevu a chlazení a následnou aplikací vhodných postupů získat neznámé parametry matematického modelu vzhledem k ohřevu (přenos 2.23) a vzhledem k chlazení (přenos 2.24). Nejprve se experimentálně změří přechodová charakteristika ohřevu a po dosažení maximální ustálené teploty se přepne na chlazení a opět se odměří přechodová charakteristika.

### 2.3.1 Experimentální identifikace OHŘEVU

Změřená přechodová charakteristika pro ohřev je na obrázku 2.14. Při měření bylo na topné rezistory připojeno napájecí napětí  $U = 12 \text{ V}$ . To je také maximální možné napětí, které lze na vstup soustavy přivést (omezení dané použitým zdrojem).

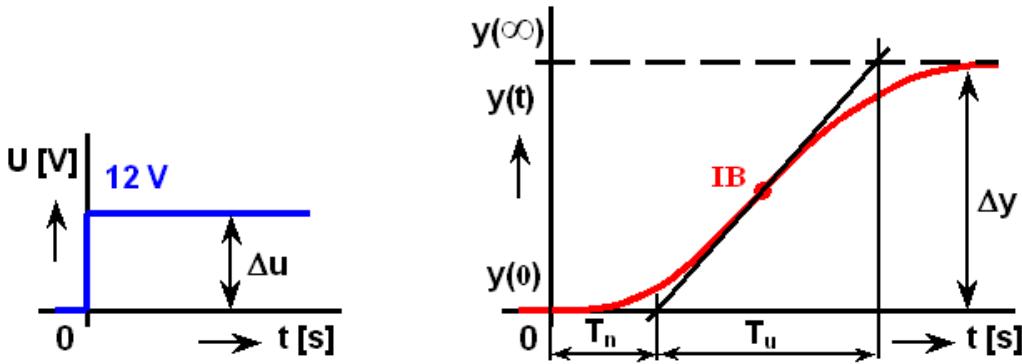


Obrázek 2.14: Naměřená přechodová charakteristika tepelné soustavy - ohřev

Naměřená přechodová charakteristika tvarem připomíná systém 2. řádu, což odpovídá teoreticky stanovenému modelu. Nyní využijeme postupu uvedeného v [8] a budeme hledat vhodný approximační přenos.

Počáteční teplota hliníkového bločku byla určena momentální teplotou okolí, tedy  $y(0) = 21,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Při skoku vstupního napětí  $\Delta u = 12 \text{ V}$  bylo dosaženo maximální ustálené teploty  $y(\infty) = 57 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Statického zesílení systému  $k_s$  tedy bude:

$$k_s = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{y(\infty) - y(0)}{\Delta u} = \frac{57 - 21,9}{12} = 2,925 \quad (2.25)$$



Obrázek 2.15: Vstupní skok a obecný tvar přechodové charakteristiky 2. řádu

Dále se odečte doba průtahu  $T_u = 50 \text{ s}$  a doba náběhu  $T_n = 850 \text{ s}$ , jejichž význam je zřejmý z obrázku 2.15, kde IB je inflexní bod křivky. Z těchto dob se určí poměrová hodnota  $\tau_u$ :

$$\tau_u = \frac{T_u}{T_n} \doteq 0,0588 \quad (2.26)$$

Protože je hodnota  $\tau_u$  menší než stanovená mez 0,104, bude muset být pro approximaci použit přenos systému 2. řádu s různými časovými konstantami. Což přesně odpovídá tvaru přenosu 2.23. Poměr časových konstant  $A_2$  a  $A_1$  uvedených v tomto přenosu se označuje jako  $\tau_2$  a platí pro něj:

$$\tau_2 = \frac{A_2}{A_1} \quad ; \quad A_1 > A_2 \quad (2.27)$$

Hodnotu poměrové konstanty  $\tau_2$  určíme z tabulky 2.3. Pro  $\tau_u = 0,0588 \rightarrow 0,050$  zvolíme  $\tau_2 = 0,1$ . Dle rovnice 2.27 bude platit:

$$A_2 = \tau_2 \cdot A_1 = 0,1 A_1 \quad (2.28)$$

$\tau_2$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\tau_u$	0,050	0,072	0,084	0,092	0,097	0,100	0,102	0,103	0,103	0,104

Tabulka 2.3: Určení konstanty  $\tau_2$  z velikosti konstanty  $\tau_u$

Z naměřené přechodové charakteristiky se odečte doba  $t_1$ , ve které dosahuje výstupní veličina 72% ustálené hodnoty, a vychází se z toho, že pro tuto dobu platí:

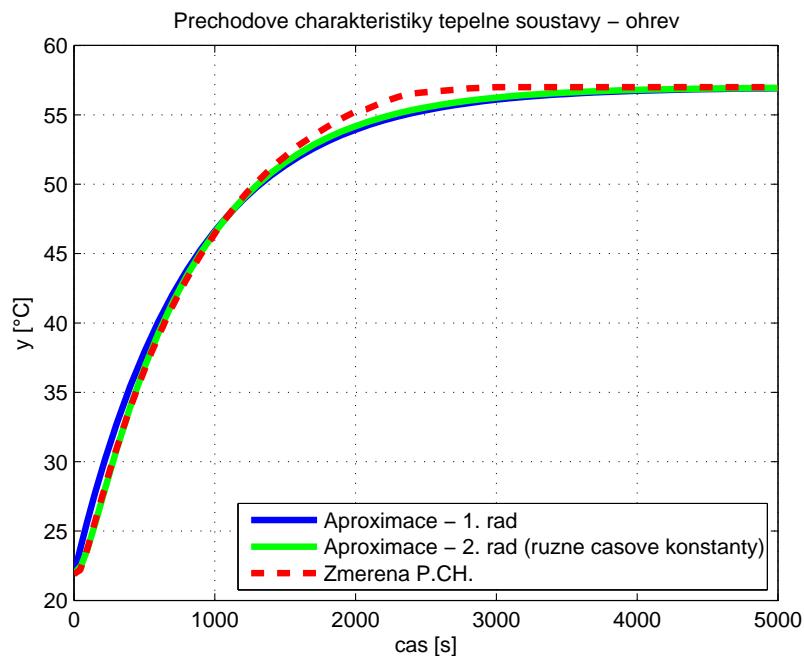
$$\frac{t_1}{1,2564} = A_1 + A_2 \quad (2.29)$$

V našem případě  $t_1 \doteq 1050 \text{ s}$ . Dosazením za  $t_1$  do rovnice 2.29 a následnou substitucí za časovou konstantu  $A_2$  z rovnice 2.28 vyjádříme:  $A_1 \doteq 760 \text{ s}$ . Zpětným dosazením za  $A_1$  do 2.28 získáme také druhou časovou konstantu:  $A_2 \doteq 76 \text{ s}$ .

Experimentálně jsme tedy určili přenos ohřevu soustavy jako systém 2. řádu:

$$P_{OH}(s) = \frac{k_s}{(1 + A_1 \cdot s)(1 + A_2 \cdot s)} = \frac{2,925}{(1 + 760s)(1 + 76s)} = \frac{2,925}{57760s^2 + 836s + 1} \quad (2.30)$$

Přechodová charakteristika nalezeného přenosu 2.30 pro vstupní skok napájecího napětí 12 V je zobrazena v porovnání s naměřenou přechodovou charakteristikou na obrázku 2.16. Hodnoty aproximačního přenosu jsou zde samozřejmě posunuty o teplotu okolí ( $y(0) = 21,9 ^\circ C$ ). Protože je časová konstanta  $A_2$  nalezeného systému 2. řádu velmi mála a v porovnání s časovou konstantou  $A_1$  desetkrát menší, bylo by možné provést aproximaci pouze systémem 1. řádu (také na obrázku). Systém ohřevu tepelné soustavy byl ale odvozen jako systém 2. řádu a proto budeme využívat pouze tohoto modelu.



Obrázek 2.16: Přechodové charakteristiky reálného systému a aproximačních modelů

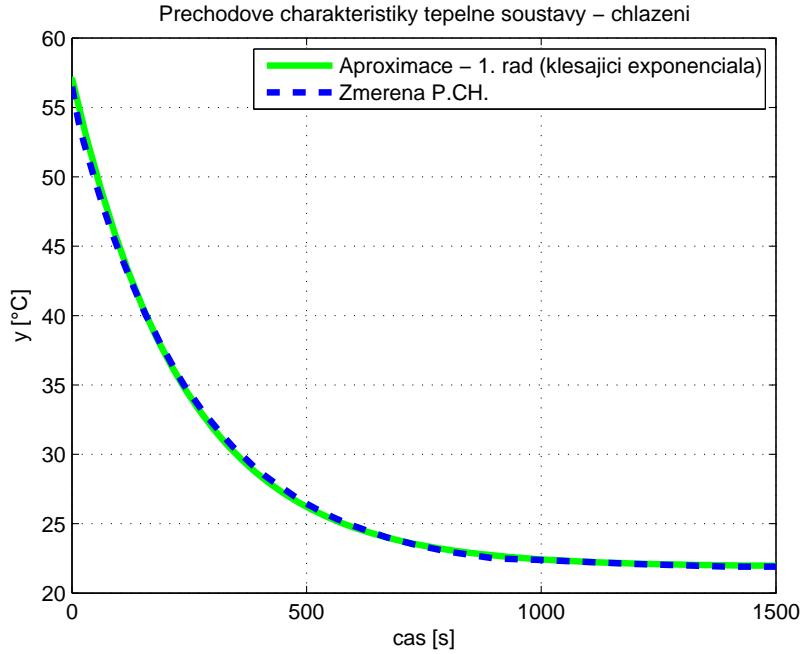
### 2.3.2 Experimentální identifikace CHLAZENÍ

Měření přechodové charakteristiky chlazení bylo provedeno z maximální ustálené teploty vyhřívaného tělesa (tj.  $y(0) = 57 ^\circ C$ ), kdy došlo k vypnutí ohřevu a okamžitému zapnutí chlazení pomocí menšího větráčku, na který se přivedlo vstupní napětí  $U_{CHL} = 12$  V. Změřená přechodová charakteristika pro chlazení je na obrázku 2.17. Tento systém approximujeme přenosem 1. řádu (viz. přenos 2.24).

Statické zesílení  $k_s$  systému chlazení bude stejné jako v případě ohřevu (viz. rovnice 2.25), protože se systém ochladí opět na teplotu okolí  $21,9 ^\circ C$ , čímž zůstane zachována stejná velikost  $\Delta y$ . Zesílení  $k_s$  bude mít pouze záporné znaménko.

Tedy:

$$k_s = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{y(\infty) - y(0)}{\Delta u} = \frac{21,9 - 57}{12} = -2,925 \quad (2.31)$$



Obrázek 2.17: Přechodové charakteristiky reálného systému a approximačního modelu

Jako neznámý parametr přenosu chlazení ještě zbývá určit časovou konstantu  $\tau$ , kterou je pro systém 1. řádu možné stanovit jako dobu, kdy dosahuje přechodová charakteristika 63% ustálené měřené teploty. V našem případě  $\tau = 238 \text{ s}$ .

Experimentálně jsme tedy určili přenos chlazení soustavy jako systém 1. řádu:

$$P_{CHL}(s) = \frac{k_s}{\tau \cdot s + 1} = \frac{-2,925}{238s + 1} \quad (2.32)$$

Přechodová charakteristika tohoto přenosu pro vstupní skok napětí 12 V je vynesena rovněž na obrázku 2.17 (approximace). K této charakteristice je přičtena počáteční teplota, ze které se soustava začíná ochlazovat ( $y(0) = 57 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Approximace je poměrně přesná.

## 2.4 Shrnutí vlastností tepelné soustavy

Při hledání matematického popisu realizované tepelné soustavy jsme použili těchto několik zjednodušujících předpokladů:

1. Systém tepelné soustavy jsme rozdělili na dva jednodušší subsystémy (ohřev a chlazení soustavy) a ty zpracovávali odděleně s ohledem na jejich další vzájemné souvislosti.

2. Předpokládali jsme nezávislost elektrického odporu topných rezistorů na teplotě a také neměnnou teplotu okolí.
3. Při modelování soustavy jsme přešli od systému s rozprostřenými parametry, mezi které tepelné systémy běžně patří, na systém se soustředěním parametry. Uvažovali jsme tedy stavové veličiny, které nebyly závislé na prostorových souřadnicích.

Nalezením matematického popisu soustavy vzhledem k ohřevu a chlazení a následnou experimentální identifikací jsme získali přenosovou funkci z napájecího napětí ohřevu na měřenou teplotu a také přenosovou funkci z napájecího napětí chlazení na měřenou teplotu:

$$P_{OH}(s) = \frac{2,925}{(1 + 760s)(1 + 76s)} = \frac{2,925}{57760s^2 + 836s + 1}; \quad P_{CHL}(s) = \frac{-2,925}{238s + 1} \quad (2.33)$$

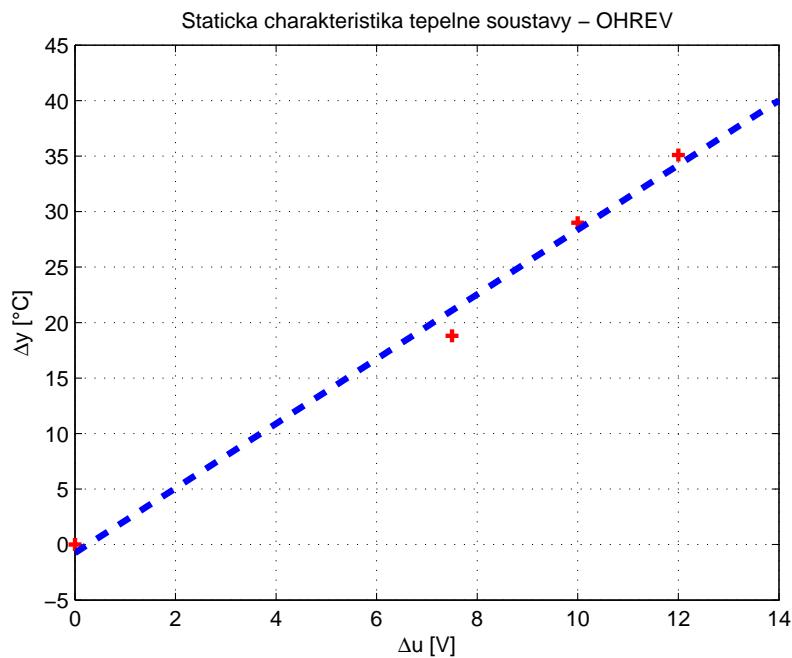
Pokud máme takto stanovené přenosy, je zřejmé, že oba systémy uvažujeme jako:

- dynamické (stavové rovnice obsahují derivaci podle času)
- spojité ( $t \in \mathbf{R}$ )
- deterministické (neuvažujeme žádnou náhodnou složku)
- časově neproměnné (neuvažujeme žádný proměnný parametr)
- lineární

Zda je **systém lineární** je možné se přesvědčit pomocí tzv. statické charakteristiky, která vyjadřuje závislost změny výstupu  $\Delta y$  na změně vstupu  $\Delta u$ . Experimentálně změřená statická charakteristika pro ohřev tepelné soustavy je na obrázku 2.18.

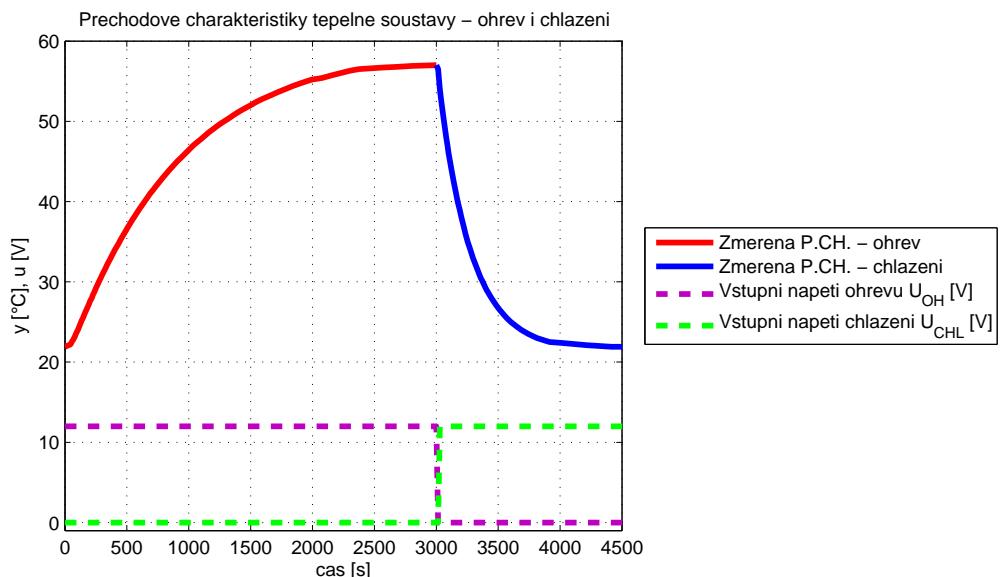
Tuto statickou charakteristiku je možné považovat přibližně za lineární. I když při vstupním napětí topných rezistorů nižším než 5 V se měřená teplota reálné soustavy již neustálí na hodnotě, na které by se měla ustálit podle této přímky, budeme systém vzhledem k ohřevu přesto považovat za lineární. Později se totiž dozvímme, že vstupy soustavy nebudou řízeny spojitou změnou napájecích napětí ale díky regulátoru E5CK pomocí pulsní šířkové modulace, což přispěje k lepší linearitě systému.

Linearita systému vzhledem k chlazení je značně diskutabilní, neboť se soustava může samovolně ochlazovat i bez chlazení pomocí větráčku. Proto budeme při návrhu regulátoru využívat raději mnohem více modelu pro ohřev soustavy. Regulace pomocí samotného ohřevu bude mít v této regulační úloze větší prioritu.



Obrázek 2.18: Statická charakteristika tepelné soustavy pro ohřev

Návrh regulace teploty pomocí ohřevu i chlazení, bude více komplikovaný především z důvodu výrazné **nesymetrické dynamiky** tepelné soustavy zmíněné již v úvodu této práce (viz. kapitola 1). Již při porovnání přenosů pro ohřev a chlazení (2.33) je možné si všimnout výrazně odlišných časových konstant. Při maximálním topném výkonu trvá ohřev podstatně déle než ochlazování při maximálním chladícím výkonu - což dokazuje obrázek 2.19. Jedná se tedy o dva subsystémy s významně odlišným chováním.



Obrázek 2.19: Ukázka nesymetrické dynamiky - ohřev a chlazení soustavy

# Kapitola 3

## Regulátor E5CK Omron

Regulátor E5CK od firmy Omron je vylepšený kompaktní digitální regulátor, jehož hardwarové vybavení je možné volit a přizpůsobovat přímo podle řízené soustavy či řízeného procesu. Regulátor se totiž skládá z různých modulů a je tedy možné ho dle potřeby dovybavit dalšími jednotkami. Jeho velkou předností je možnost připojení širokého sortimentu senzorů (průmyslové termočlánky K, J, T, E, N, R, S, B či odporový platinový teploměr Pt100) nebo využití proudového či napěťového vstupu (0 až 20 mA, 4 až 20 mA, 0 až 5 V, 1 až 5 V, 1 až 10 V). Na straně výstupu jsou k dispozici dva řídící výstupy (OUT1 a OUT2), přičemž si lze opět vybrat z několika typů výstupních jednotek - binární reléový výstup, lineární napěťový výstup nebo lineární proudový výstup. Pro účely aktivace alarmu nebo pomocného prvku regulačního obvodu může být využit i jeden pomocný reléový výstup SUB1, který je zabudován ve všech základních jednotkách regulátoru. V této regulační úloze ale nebude využit. Pro regulaci ohřevu, případně ohřevu i chlazení, budou postačovat výstupy OUT1 a OUT2.

Regulátor je pro účely řízení tepelné soustavy přepnut do režimu vylepšeného PID řízení. Mohl by ale také pracovat v režimu obyčejného dvoupolohového ON/OFF řízení. Řada E5CK je dále vybavena funkcí autotuning (automatické naladění) a selftuning (samočinné seřizování pomocí Fuzzy ladění).

Před samotným připojením regulátoru k řízené tepelné soustavě, bude tedy nejprve nutné ho pro řízení takového systému připravit a nakonfigurovat alespoň základní parametry související především s použitým vybavením v regulačním obvodě.

V této kapitole budou dále popsány další významné parametry a nastavení tohoto regulátoru, přičemž bude využito dokumentace [1] od firmy Omron.

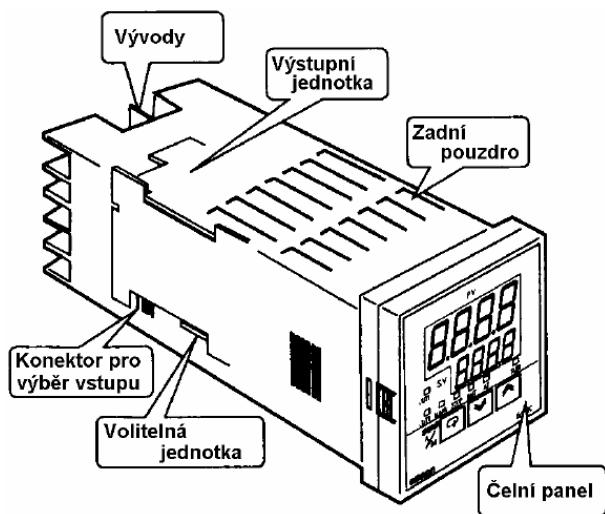
### 3.1 Vlastnosti regulátoru a jeho příprava

Z hlediska úlohy regulace teploty a navržené tepelné soustavy v kapitole 2 nás zajímají především tyto vlastnosti použité konfigurace regulátoru:

- Režim regulace: vylepšené PID řízení

- Výstupní jednotka: OUT1 = relé, OUT2 = relé (relé: AC 250V, 3A - odporová zátěž)
- Zabudovaný pomocný výstup SUB1 (relé: AC 250V, 1A - odporová zátěž)
- Vstup: platinový odporový teploměr Pt100 (možný rozsah regulátoru -199,9 °C až 650 °C) - zvoleno v kapitole 2.1.4
- Vzorkovací perioda: T = 250 ms (pro teplotní vstup)
- Podpora pro regulaci teploty: rozdělení akční veličiny PID řízení na řídicí výstup ohřev (Heat) a řídicí výstup chlazení (Cool)
- Paměť: uchovává data i po vypnutí napájení (počet zápisů = 100000 operací)
- Možnost doplnění regulátoru o volitelnou jednotku - například Komunikační jednotku se sériovým rozhraním (RS-232C nebo RS-485)
- Údaje jsou zobrazovány na dvou displejích regulátoru - v základním režimu jeden displej zobrazuje měrenou regulovanou veličinu a druhý nastavenou žádanou hodnotu
- Možnost monitorování velikosti akčních veličin výstupů OUT1 a OUT2
- Možnost ručního nastavování velikosti akčních veličin výstupů OUT1 a OUT2 pomocí Manuálního módu regulátoru
- Napájení regulátoru: AC 100-240V, 50/60 Hz, 15VA

Na obrázku 3.1 jsou popsány hlavní části regulátoru.

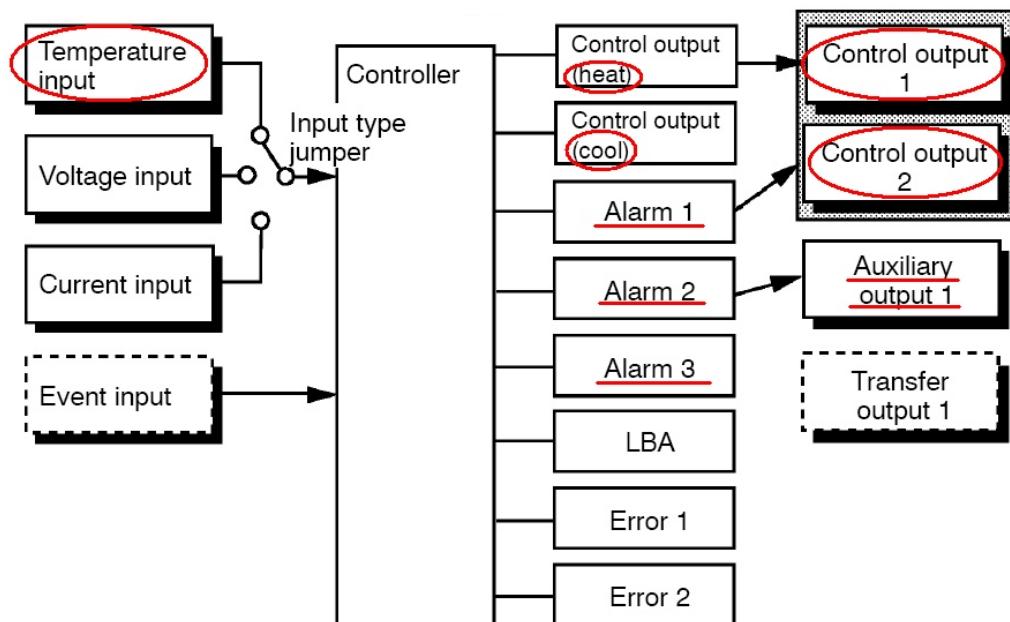


Obrázek 3.1: Hlavní části regulátoru E5CK

### 3.1.1 Programovatelné přiřazení výstupů a nastavení vstupu

U tohoto typu regulátoru je implementována velice zajímavá a užitečná možnost "Programovatelného přiřazení logických výstupů" na výstupy fyzické. V použité konfiguraci jsou fyzickými výstupy binární relé OUT1, OUT2 a SUB1 (Auxiliary output 1=pomocný výstup). Na výstupy OUT1 a OUT2 lze libovolně přiřadit logický řídicí výstup ohřev (Heat), řídicí výstup chlazení (Cool) nebo některý z alarmů (Alarm 1 až 3). Na pomocný výstup SUB1 potom můžeme přesměrovat Alarm 1, 2 nebo 3. Pro regulaci teploty byla zvolena varianta, kdy je na výstup OUT1 přiřazen řídicí výstup ohřev (Heat), na výstup OUT2 řídicí výstup chlazení (Cool) a na pomocném výstupu SUB1 spíná relátko při aktivaci Alarmu 1.

Pomocí jumperu je také nutno zvolit typ VSTUPU. V našem případě volíme teplotní vstup - pro použité čidlo Pt100. Tento princip přiřazení výstupů a nastavení vstupu je znázorněn na následujícím obrázku 3.2.



Obrázek 3.2: Princip "Programovatelného přiřazení výstupů" a nastavení typu vstupu

### 3.1.2 Princip kvazispojité regulace

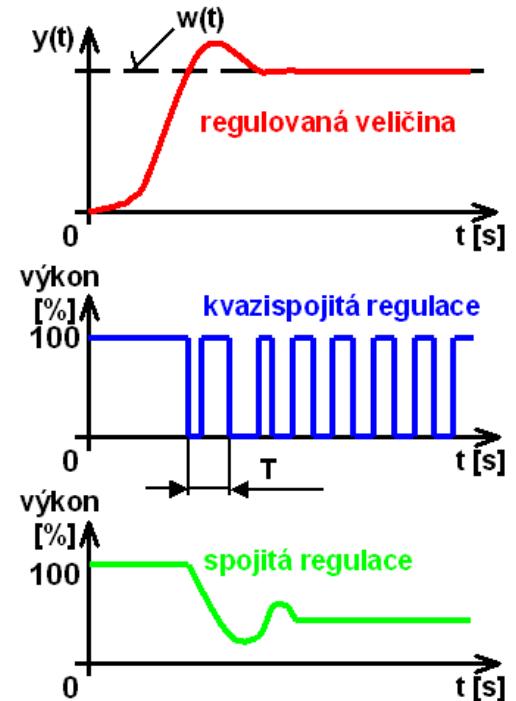
Protože jsou jako výstupní členy regulátoru použity relé na výstupech OUT1 a OUT2, je nutné si představit způsob regulace, jaký bude regulátor využívat. Regulátor je v režimu řízení PID a "uvnitř" pracuje podle určitého PID algoritmu. Počítá tedy hodnoty akčního zásahu v rozsahu 0 až 100% výkonu. Tato velikost v procentech se potom dále převádí pomocí PWM<sup>4</sup> na signál, který teprve ovládá příslušné výstupní relé regulátoru (OUT1

<sup>4</sup>Pulse Width Modulation = pulsně šířková modulace

nebo OUT2). Regulátor tedy procentuální hodnotu akčního zásahu přepočítá na šířku pulzu, přičemž perioda pulzního signálu je konstantní.

Regulátor E5CK umožňuje nastavovat periodu takto šířkově modulovaného výstupního signálu dokonce zvlášť pro výstup OUT1 (heat) a zvlášť pro OUT2 (cool). V manuálu k regulátoru E5CK bývá tato perioda označována jako "Interval řízení" (viz. parametry v 3.3.4). Regulace, která využívá PWM pro ovládání spínacího relé, se nazývá kvazispojitá. Princip takové regulace je ilustrován společně s klasickou spojitou regulací na obrázku 3.3.

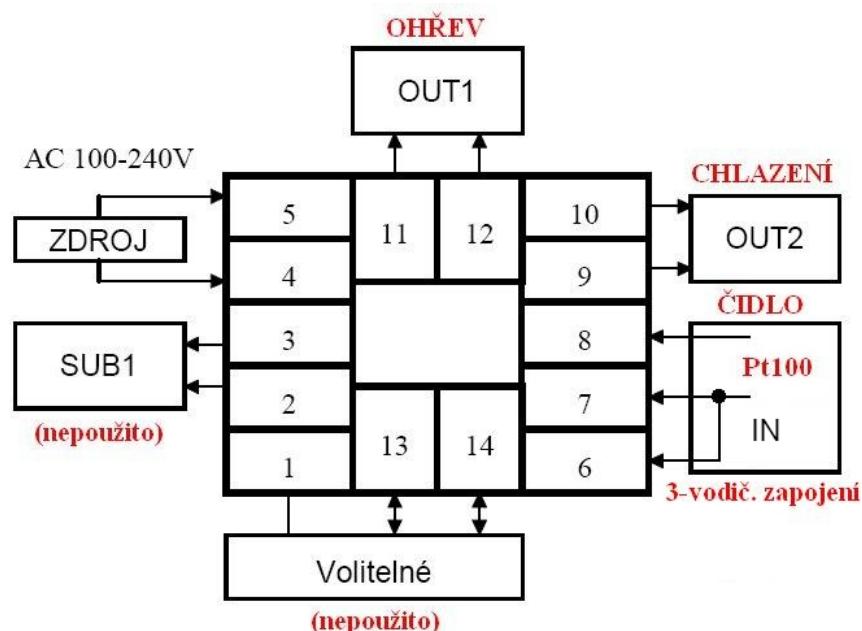
Maximální výkon (100% akční veličiny) představuje v našem případě sepnutí zdroje 12 V po dobu jedné pulzní periody. Napětí 12 V je maximální mez akčního zásahu jak pro ohřev (OUT1), tak pro chlazení (OUT2).



Obrázek 3.3: Princip kvazispojité regulace

### 3.1.3 Zapojení svorkovnice regulátoru

Zapojení svorkovnice regulátoru pro připojení vstupů a výstupů je na obrázku 3.4.



Obrázek 3.4: Zapojení svorkovnice regulátoru E5CK pro připojení vstupu a výstupů

Na výstupech OUT1 a OUT2 jsou spínány zdroje napětí (12 V), ty v obrázku nejsou zakresleny. Čidlo Pt100 je k regulátoru připojeno pomocí třívodičového zapojení zmiňovaného v kapitole 2.1.4.

## 3.2 Základní ovládání regulátoru

Veškeré funkce regulátoru jsou indikovány a ovládány prostřednictvím čelního panelu - viz. obrázek 3.5.

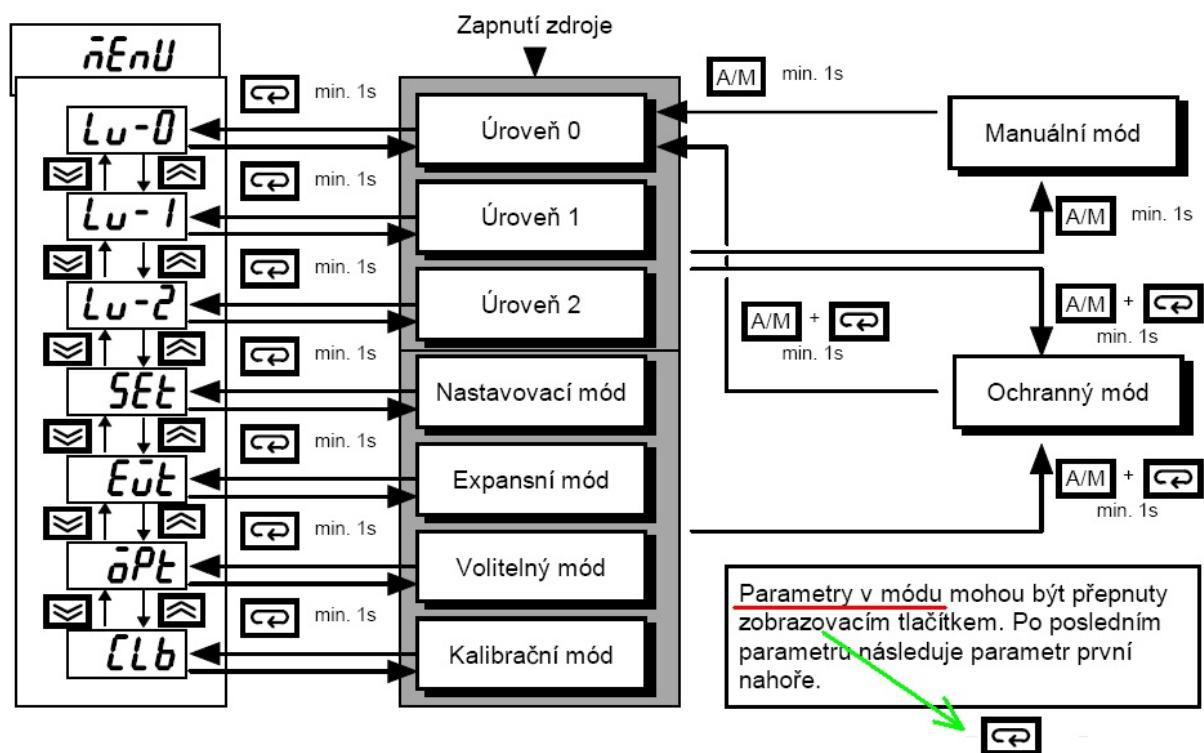


Obrázek 3.5: Čelní panel regulátoru E5CK - ovládání

Základní ovládání regulátoru, včetně přepínání mezi jednotlivými úrovněmi regulátoru (viz. obrázek 3.6), lze shrnout v těchto bodech:

- Pro vstup do dané úrovni (z Menu úrovní) nebo opuštění aktuální úrovni (návrat do Menu úrovní) se stiskne "Zobrazovací tlačítko" (na obrázku 3.5) po dobu delší než 1s.

- Pro výběr dané úrovně (Úroveň 0, Úroveň 1, Úroveň 2, Nastavovací mód, Expanzní mód) v Menu úrovní se použijí tlačítka “Nahoru / Dolů”.
- Přepínání mezi jednotlivými parametry v dané úrovni se provádí pomocí “Zobrazovacího tlačítka” po dobu kratší než 1s.
- Změna hodnoty aktuálně vybraného parametru se provádí pomocí tlačítek “Nahoru / Dolů”.
- Do speciálního Manuálního módu se dostaneme, pokud máme vybraný libovolný parametr v Úrovni 0, 1 nebo 2 a stiskneme tlačítko “A/M” po dobu delší než 1s. Podobným způsobem aktivujeme i Ochranný mód regulátoru, rozdíl je pouze v tom, že stiskneme zároveň tlačítko “A/M” a “Zobrazovací tlačítko” (viz. obrázek 3.6).



Obrázek 3.6: Přepínání mezi jednotlivými úrovněmi regulátoru E5CK

Hodnoty nastavovaného parametru se uloží do paměti regulátoru při přechodu na další parametr (“Zobrazovací tlačítko” stisknuto po dobu kratší než 1s) nebo při opuštění aktuální úrovně (“Zobrazovací tlačítko” stisknuto po dobu delší než 1s).

### 3.3 Popis vybraných úrovní a parametrů regulátoru

V této kapitole budou popsány pouze módy, úrovně a parametry regulátoru E5CK související s touto regulační úlohou. V tabulkách níže (obrázky 3.7, 3.8, 3.9, 3.10 a 3.11) jsou vždy uvedeny všechny parametry dané úrovně, významné parametry jsou pak zvýrazněny a dále vysvětleny. (Podrobný popis všech parametrů regulátoru je obsažen v příslušném Datasheetu k regulátoru E5CK na stránkách firmy Omron [1].)

#### 3.3.1 Význam speciálního módu - Manuální mód

V tomto módu je možné **ručně** nastavit velikost akčních veličin pro výstup OUT1 (ohřev) a výstup OUT2 (chlazení). Rozsah možných nastaviteľných hodnot je 0 až 100. Při aktivaci manuálního módu se na čelním panelu rozsvítí světelná dioda označená jako "MANU". Tento mód je možné využít například pro měření přechodových charakteristik řízené soustavy nebo pro přímé ovládání akčního členu.

#### 3.3.2 Význam speciálního módu - Ochranný mód

Ochranný mód je určen pro zablokování přístupu do úrovní regulátoru popsáncích v následujících odstavcích. Pro každou úroveň je možné si zvolit, zda do ní bude mít běžný uživatel regulátoru přístup či nikoliv.

#### 3.3.3 Význam podstatných parametrů - Úroveň 0

Symbol	Název parametru
! čísla na obou displejích	PV/SP
SP - ď	Nastavená hodnota během SP rampy
! ď	Monitor MV (ohřev)
! Č - ď	Monitor MV (chlazení)
r - ď	Chod / zastavení

Obrázek 3.7: Parametry pro Úroveň 0

##### PV/SP (regulovaná veličina/žádaná hodnota)

Toto je základní pozorovací režim během regulace.

PV (Process Value) = regulovaná veličina je zobrazována na displeji č. 1. Jedná se o měřenou veličinu, proto tento údaj nelze nastavovat.

SP (Setting Value) = žádaná hodnota je zobrazována na displeji č. 2. Tato hodnota se nastavuje.

### Monitor akční veličiny MV (ohřev)

Měření velikosti akční veličiny ohřev - přiřazené na výstup regulátoru OUT1. Tento parametr nemůže být nastavován (jedná se o měření). Rozsah monitoru akční veličiny ohřev je 0 až 100, kde 100 znamená, že relé je sepnuto po celou dobu "Intervalu řízení (ohřev)" (parametr Úrovně 1 - viz. odstavec 3.3.4).

### Monitor akční veličiny MV (chlazení)

Měření velikosti akční veličiny chlazení - přiřazené na výstup regulátoru OUT2. Tento parametr nemůže být nastavován (jedná se o měření). Rozsah monitoru akční veličiny chlazení je 0 až 100, kde 100 znamená, že relé je sepnuto po celou dobu "Intervalu řízení (chlazení)" (parametr Úrovně 1 - viz. odstavec 3.3.4).

## 3.3.4 Význam podstatných parametrů - Úroveň 1

Symbol	Název parametru
<u>RE</u>	Provádění/zrušení automatické ladění
<u>SP-0</u>	Nastavení bodu 0
<u>SP-1</u>	Nastavení bodu 1
<u>RL-1</u>	Hodnota alarmu 1
<u>RL-2</u>	Hodnota alarmu 2
<u>RL-3</u>	Hodnota alarmu 3
<u>P</u>	Pásмо proporcionality
<u>L</u>	Integrační doba
<u>d</u>	Derivační doba
<u>C-SC</u>	Koeficient chlazení
<u>C-db</u>	Pásmo necitlivosti
<u>OF-r</u>	Hodnota ručního nastavení
<u>HYS</u>	Hystereze (ohřev)
<u>CHYS</u>	Hystereze (chlazení)
<u>CP</u>	Interval řízení (ohřev)
<u>C-CP</u>	Interval řízení (chlazení)

Obrázek 3.8: Parametry pro Úroveň 1

## **Provádění/zrušení automatického ladění**

Automatické ladění (autotuning) lze použít pouze v případě, kdy regulátor pracuje v režimu vylepšeného PID řízení. Od uživatele se před zahájením autotuningu vyžaduje provedení změny žádané hodnoty. Po aktivaci této funkce se na čelním panelu rozblíká světelná dioda AT. Regulátor začne proces ladění tím, že pomocí akčních zásahů provede sérii testů s řízenou soustavou. Když je s dispozicí dostatek vstupních a výstupních dat, regulátor sám autotuning ukončí. Po skončení automatického ladění jsou okamžitě nastaveny nově nalezené parametry PID regulátoru. Výsledky automatického ladění regulátoru E5CK pro navrženou tepelnou soustavu jsou popsány v kapitole 5.1.

## **Hodnota Alarmu 1**

Tento parametr slouží pro nastavení velikosti X alarmového výstupu Alarm 1, který byl již přiřazen na pomocný výstup SUB1. Podmínkou správné funkce některého z alarmů totiž je, že musí být přiřazen na některý fyzický výstup. Pokud není alarm přiřazen na některý výstup, potom není vidět ani jako parametr v Úrovni 1. Význam čísla X je určen parametrem "Typ alarmu 1" (v Módu nastavení - viz. odstavec 3.3.6).

## **Pásma proporcionality**

Nastavení hodnoty pásma proporcionality. Pásma proporcionality  $p.p.$  je neprímo úměrné zisku regulátoru (zesílení  $k_P$ ) a platí tedy:

$$\frac{p.p. [\%]}{100} = \frac{1}{k_P} \quad (3.1)$$

Pásma proporcionality je vlastně pásmo v okolí požadované hodnoty, ve kterém regulátor ovládá akční veličinu spojitě v rozsahu 0-100%. Jeli pásmo proporcionality příliš úzké, pak může regulovaná veličina kmitat, protože malé změny regulační odchylky odpovídají neúměrně velká změna akční veličiny, která způsobí opět překmit řízené teploty.

Levá strana rovnice 3.1 je hodnota, která se nastavuje na regulátoru. Pro potřeby pozdější simulace se z ní určí zesílení proporcionalního regulátoru  $k_P$  (jako převrácená hodnota).

## **Integrační doba**

Nastavení integrační časové konstanty  $T_I$  v sekundách.

## **Derivační doba**

Nastavení derivační časové konstanty  $T_D$  v sekundách.

### **Interval řízení (ohřev)**

Nastavuje pulzní výstupní periodu (tj. dobu trvání jednoho regulačního cyklu) pro ohřev, tzn. v našem případě pro výstup OUT1. Při jeho nastavování je nutno vzít do úvahy, že krátký čas intervalu řízení zvyšuje jakost regulace, zejména u rychlých soustav. Naproti tomu časté spínání zkracuje životnost mechanických spínačů (relé). Pro regulaci teploty byl zvolen interval řízení pro ohřev 5 s.

### **Interval řízení (chlazení)**

Platí totéž co pro "Interval řízení (ohřev)", pouze s tím rozdílem, že tento parametr nastavuje pulzní výstupní periodu (tj. dobu trvání jednoho regulačního cyklu) pro chlazení, tzn. v našem případě pro výstup OUT2. Interval řízení pro chlazení byl nastaven stejně jako v případě ohřevu na 5 s.

### **3.3.5 Význam podstatných parametrů - Úroveň 2**

Symbol	Název parametru
<i>r-L</i>	Dálkový/lokální
<i>SPrU</i>	Časová jednotka SP rampy
<i>SPrE</i>	Nastavená hodnota SP rampy
<i>LbA</i>	Detekční doba LBA
<i>nu-S</i>	MV při zastavení
<i>nu-E</i>	MV při chybě PV
<i>oL-H</i>	Horní limit MV
<i>oL-L</i>	Dolní limit MV
<i>orL</i>	Omezení poměru změny MV
<i>LnF</i>	Vstupní digitální filtr
<i>ALH1</i>	Hystereze alarmu 1
<i>ALH2</i>	Hystereze alarmu 2
<i>ALH3</i>	Hystereze alarmu 3
<i>LnSH</i>	Posun vstupu horního omezení (teplota)
<i>LnSL</i>	Posun vstupu dolního omezení (teplota)

Obrázek 3.9: Parametry pro Úroveň 2

#### **Hystereze Alarmu 1**

Nastavuje hysterezi pro Alarm 1.

## Posun vstupu horního a dolního omezení (teplota)

Pokud se změní oba tyto parametry o stejnou hodnotu, znamená to, že se provedl posun (offset) hodnoty vstupního signálu. Pro správné měření teploty hliníkového bločku uvnitř tepelné soustavy bylo nutné provést offset teploty čidla Pt100 o -3 °C.

### 3.3.6 Význam podstatných parametrů - Mód nastavení

Symbol	Název parametru
! <b>EN-T</b>	Typ vstupu
! <b>EN-H</b>	Horní limit stupnice
! <b>EN-L</b>	Dolní limit stupnice
<b>dP</b>	Desetinná čárka
<b>d-U</b>	Výběr °C/F
! <b>ENET</b>	Inicializace parametru
! <b>OUT1</b>	Přiřazení řídícího výstupu 1
! <b>OUT2</b>	Přiřazení řídícího výstupu 2
<b>SUB1</b>	Přiřazení pomocného výstupu 1
<b>AL1</b>	Typ alarmu 1
<b>AL1n</b>	Alarm 1 otevřený při alarmu
<b>AL2</b>	Typ alarmu 2
<b>AL2n</b>	Alarm 2 otevřený při alarmu
<b>AL3</b>	Typ alarmu 3
<b>AL3n</b>	Alarm 3 otevřený při alarmu
<b>ořE</b>	Činnost přímá/záporná

Obrázek 3.10: Parametry pro Mód nastavení

#### Typ vstupu

Nastavení tohoto parametru souvisí s nastavením jumperu pro druh použitého vstupu. Tento parametr byl nastaven na hodnotu "1", což znamená, že použitým vstupem je platinový odporový teploměr Pt100.

#### Přiřazení řídícího výstupu 1 a 2 a pomocného výstupu 1

Jak již bylo zmíněno, na řídící výstup 1 (OUT1) je přiřazen OHŘEV (Heat), na řídící výstup 2 (OUT2) je přiřazeno CHLAZENÍ (Cool) a pomocný výstup (SUB1) je přiřazen

Alarm 1. Pokud je tedy sepnuto relé některých z fyzických výstupů OUT1, OUT2 nebo SUB1 je zároveň rozsvícena i příslušná LED na čelním panelu regulátoru.

### Typ Alarmu 1

Lze nastavit jeden z mnoha typů alarmů. Implicitně již je přednastaven "Typ alarmu", který se aktivuje, pokud regulovaná veličina překročí žádanou hodnotu o hodnotu X. Kde X je číselný údaj nastavený v parametru "Hodnota alarmu 1" z Úrovně 1. Tento typ alarmu také využijeme.

### Alarm 1 otevřený při alarmu

Tento parametr je nastavený na hodnotu "Zavřený při alarmu". To znamená, že pokud nastanou podmínky pro aktivaci Alarmu 1 (Alarm ON), pak se výstupní relé pomocného výstupu SUB1 sepne a světelná dioda SUB1 se rozsvítí. Pokud by byl parametr nastaven na hodnotu "Otevřený při alarmu", pak by se relé výstupu SUB1 a světelná dioda na předním panelu chovaly přesně opačně.

### 3.3.7 Význam podstatných parametrů - Expanzní mód

Symbol	Název parametru
SL-H	Horní limit nastavené hodnoty
SL-L	Dolní limit nastavené hodnoty
! EntL	PID / ON/OFF (dvoupolohové řízení)
St	ST
St-b	stabilní rozsah ST
ALFA	$\alpha$
AE-G	vypočtený zisk AT
rEST	Zálohová sekvence nastavovací metody
rET	Automatický návrat zobrazovacího módu
AE-H	Hystereze AT
LbAb	Detekční šířka LBA

Obrázek 3.11: Parametry pro Expazní mód

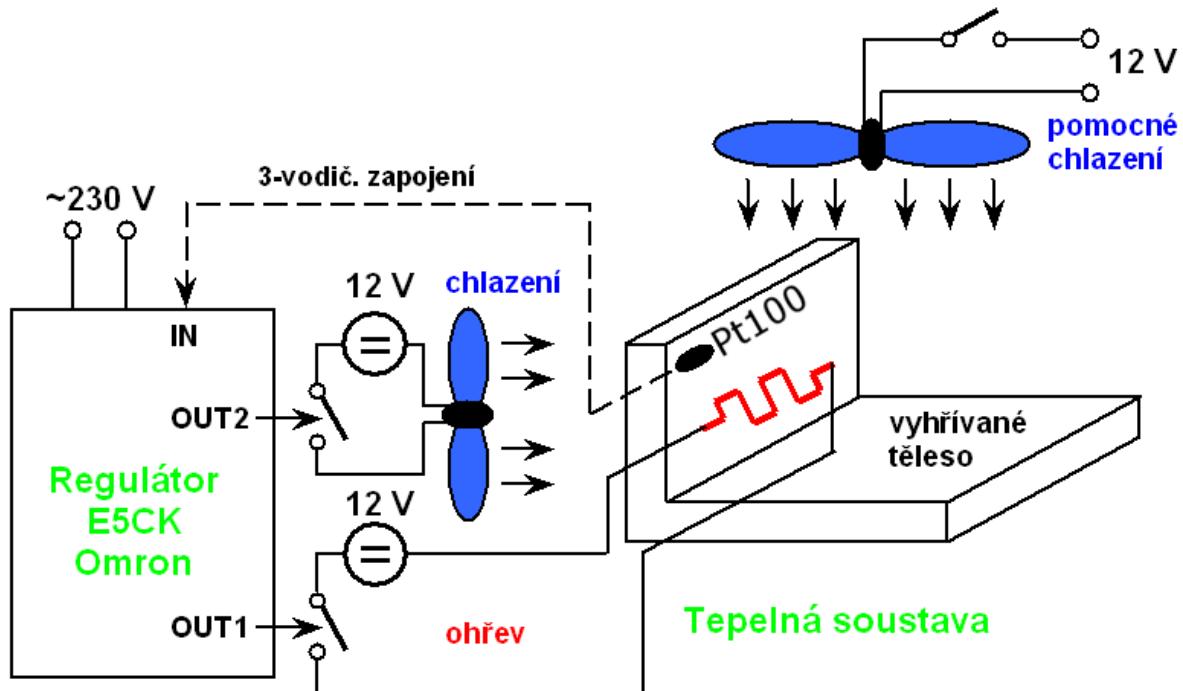
### PID / ON/OFF

Vybírá zdokonalené PID řízení nebo dvoupolohové (ON/OFF) řízení.

# Kapitola 4

## Návrh a realizace řízení

Cílem této kapitoly je využít maximum informací o navržené tepelné soustavě (kapitola 2) a prostřednictvím kompaktního regulátoru E5CK od firmy Omron (kapitola 3), který pracuje v režimu vylepšeného PID řízení, vytvořit reálný model skutečného regulačního procesu. Základem správné funkce regulačního obvodu jsou optimálně nastavené hodnoty parametrů regulátoru. Optimální seřízení regulátoru pak závisí na míře znalosti regulovaného procesu. Pro správnou funkci regulačního obvodu je třeba také vhodně umístit snímače a akční členy. Zjednodušený náčrtek regulačního obvodu s řízenou tepelnou soustavou je na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1: Náčrtek regulačního obvodu pro řízení teploty

Přestože regulátor E5CK disponuje řadou podpůrných funkcí, jakými jsou již zmínovaný autotuning či selftuning, vyznačuje se velkou univerzálností a modularitou a podporuje

regulaci typu “topení” či “topení/chlazení”, k jeho správnému nastavení je přesto nutné znát alespoň přibližný model řízené soustavy.

Uzavírání regulační smyčky v reálném prostředí také přináší narozdíl od pouhých simulací řadu komplikací. Jedním z podstatných vlivů, které často výrazně ovlivňují chování regulačního obvodu, je např. **omezení akčních členů**, jehož důsledkem je pak nedostatečný výkon pro potřebný akční zásah. Další komplikací může být i neúplný nebo téměř žádný popis konkrétního implementovaného PID algoritmu ústředního členu regulátoru v příslušných uživatelských příručkách. Pro účely seřízení regulátoru E5CK je proto této otázce věnován následující odstavec.

## 4.1 Algoritmus ústředního členu regulátoru E5CK

PID regulátory jsou v dnešní době stále jednoznačně nejpoužívanějšími regulátory v průmyslu. Někde se uvádí, že až 95% všech regulačních algoritmů je typu PID. Otázkou však zůstává s jakým algoritmem řízení daný PID regulátor ve skutečnosti pracuje. Výrobci totiž velmi často tuto informaci nezveřejňují a nepublikují a nechávají tak uživatele, aby z chování regulátoru sami odhadli, jaký typ algoritmu je v daném regulátoru vlastně implementován.

Ve většině odborných knih [2] zabývajících se řízením se nejčastěji vyskytuje PID algoritmus regulátoru, který je možné v časové a přenosové oblasti vyjádřit vztahy:

$$u(t) = k_P \left[ e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right]; \quad U(s) = k_P \left[ 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right] E(s) \quad (4.1)$$

Zde ale proporcionální konstanta  $k_p$  násobí všechny 3 členy PID regulátoru, proto se jedná o tzv. **regulátor s interakcí**. Dále je možné se setkat i s tzv. **sériovou realizací** PID regulátoru, popsanou přenosem:

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_{Ps} \left( 1 + \frac{1}{T_{Is}s} \right) (1 + T_{Ds}s) = k_{Ps} \left( 1 + \frac{T_{Ds}}{T_{Is}} \right) + k_{Ps} \frac{1}{T_{Is}s} + k_{Ps} T_{Ds}s \quad (4.2)$$

Tento tvar představuje rovněž regulátor s interakcí, neboť změna velikosti jedné konstanty způsobí přenastavení i ostatních složek. Jako **regulátor bez interakce** se používá implementace regulátoru, kterou lze popsát přenosem:

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_P + \frac{k_I}{s} + k_D s \quad (4.3)$$

Tato podoba PID potom bývá označována jako tzv. **paralelní tvar**.

Regulátor E5CK se sice navenek chová jako regulátor analogový, ve skutečnosti ale pracuje výhradně s číslicovou formou signálu. Proto bude nutné vyjít z rovnic spojitého regulátoru

a PID algoritmus převést do diskrétní podoby. Zde použijeme některé pasáže uvedené v [9].

PID v číslicové podobě se pak označuje jako **PSD regulátor**. Přechod od spojité podoby PID k číslicové PSD se provede tak, že se integrace nahradí součtem (obdélníková náhrada) a derivace diferencí:

$$I(kT) = \int_0^t e(\tau) d\tau \approx T \cdot \sum_{i=1}^k e(iT); \quad D(kT) = \frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(kT) - e[(k-1)T]}{T} \quad (4.4)$$

kde  $T$  označuje periodu vzorkování a předpokládáme, že  $t = kT$ .

Aplikací vztahů 4.4 na spojitý tvar PID regulátoru z rovnice 4.1 dostáváme absolutní tvar PSD regulátoru:

$$u(kT) = k_P \left[ e(kT) + \frac{T}{T_I} \sum_{i=1}^k e(iT) + \frac{T_D}{T} \{e(kT) - e[(k-1)T]\} \right] \quad (4.5)$$

Tento tvar ovšem opět odpovídá regulátoru s interakcí. Pro algoritmus řízení regulátoru E5CK použijeme ale skutečnou formu výpočtu absolutního PSD (tedy paralelní neaktivní tvar):

$$\begin{aligned} u(kT) &= k_P e(kT) + \frac{1}{T_I} I(kT) + T_D D(kT) \\ u(kT) &= k_P e(kT) + \frac{T}{T_I} \sum_{i=1}^k e(iT) + \frac{T_D}{T} \{e(kT) - e[(k-1)T]\} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Z-přenos tohoto algoritmu potom bude:

$$C(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = k_P + \frac{T}{T_I} \frac{z}{z-1} + \frac{T_D}{T} \frac{z-1}{z} = d_0 + d_1 \frac{z}{z-1} + d_2 \frac{z-1}{z} \quad (4.7)$$

Tomuto přenosu odpovídá v Laplaceově transformaci již zmínovaný paralelní tvar spojitého PID regulátoru:

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_P + \frac{k_I}{s} + k_D s \quad (4.8)$$

Z rovnic 4.7 a 4.8 je zřejmá analogie mezi spojitým PID regulátorem a jeho číslicovou podobou PSD. Z těchto rovnic je možné napsat vztahy pro vzájemné přepočty mezi stavitebními parametry těchto regulátorů:

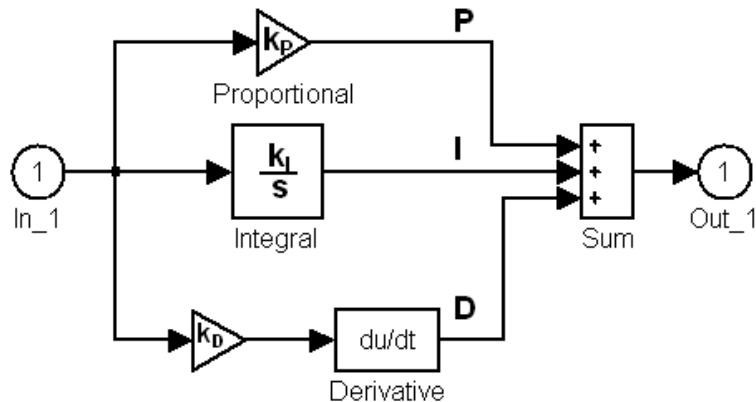
$$\begin{aligned} d_0 &= k_P \\ d_1 &= \frac{T}{T_I} \approx k_I \\ d_2 &= \frac{T_D}{T} \approx k_D \end{aligned} \quad (4.9)$$

Z těchto vztahů je patrné, že **stavitelnými parametry** číslicového regulátoru nejsou pouze proporcionální zesílení  $k_P$  (či pásmo proportionality p.p.), integrační a derivační časová konstanta  $T_I$  a  $T_D$ , ale také na perioda vzorkování  $T$ :

$$d_0, d_1, d_2 = f(k_P, T_I, T_D, T) \quad (4.10)$$

Perioda vzorkování  $T$  je pro teplotní vstup na regulátoru E5CK nastavena na 250 ms (při použití analogového vstupu by perioda vzorkování byla 100 ms).

Přepočty mezi stavitelnými parametry regulátoru (vztahy 4.9) budou nadále aplikovány při návrhu regulátorů pro řízení tepelné soustavy, kdy spojitý paralelní tvar regulátoru bude využit při návrhu regulátoru pomocí Matlabu/Simulinku [12] (na obrázku 4.2) a nalezené hodnoty parametrů ( $k_P, k_I$  a  $k_D$ ) budou následně přepočítány do podoby stavitelných parametrů digitálního regulátoru E5CK (parametry  $k_P \Rightarrow p.p.$ ,  $T_I$  a  $T_D$ ).



Obrázek 4.2: Paralelní realizace PID regulátoru používaná v Simulinku

Ještě poznamenejme, že základním požadavkům kladených na kvalitu regulace budou odpovídat standardní kritéria regulace s ohledem na typ řízené soustavy. Jsou jimi např. rychlosť regulace, stabilita odezev, velikost přeregulování (překmitu) či vhodná reakce na působení poruch. Tyto požadavky mohou ale při řízení působit velmi protichůdně. Pro PID regulátor se například velmi často musí volit kompromis mezi rychlou regulací a stabilitou odezev. V tabulce 4.1 je naznačen vliv jednotlivých parametrů PID regulátoru právě na tyto požadavky - převzato z [11].

Rostoucí konstanta	Rychlosť odezev	Stabilita odezev
$k_P$	zvyšuje	snižuje
$T_I$	snižuje	zvyšuje
$T_D$	zvyšuje	zvyšuje

Tabulka 4.1: Vliv jednotlivých parametrů PID regulátoru na rychlosť a stabilitu

Je také zřejmé, že tepelné soustavy patří k systémům, jejichž časové konstanty jsou

velmi velké nebo se jejich velikosti významně odlišují. Z tohoto důvodu tedy nemůže být ani regulace nijak zvlášť rychlá.

## 4.2 Návrh regulátoru pro ohřev

Nejprve budou navrženy regulátory pro řízení teploty pomocí samotného ohřevu. Využije se tedy zatím pouze 1 akční výstup regulátoru E5CK (OUT1 = Heat).

### 4.2.1 Seřízení regulátoru z průběhu přechodové charakteristiky

Jako první zvolíme metodu návrhu stavitelných parametrů regulátoru, která vychází ze znalosti přechodové charakteristiky řízeného systému (použito z [2]). V kapitole 2.3.1 byla stanovena doba průtahu  $T_u = 50 \text{ s}$ , doba náběhu  $T_n = 850 \text{ s}$  a také statické zesílení  $k_s = 2,925$  tepelné soustavy vzhledem k ohřevu. Z těchto hodnot lze pomocí tabulk na obrázku 4.3 přímo stanovit stavitelné parametry regulátoru PSD, které se poté nastaví na regulátoru E5CK.

<b>TYP R</b>	$k_p$	$\frac{T}{T_I}$	$\frac{T_D}{T}$
<b>P</b>	$\frac{1}{k_s} \frac{T_n}{T_u + T}$	—	—
<b>PS</b>	$\frac{1}{k_s} \left[ \frac{0,9T_n}{T_u + 0,5T} - \frac{0,135T_nT}{(T_u + 0,5T)^2} \right]$	$\frac{1}{k_s} \frac{0,27T_nT}{(T_u + 0,5T)^2}$	—
<b>PSD</b>	$\frac{1}{k_s} \left[ \frac{1,2T_n}{T_u + T} - \frac{0,3T_nT}{(T_u + 0,5T)^2} \right]$	$\frac{1}{k_s} \frac{0,67T_nT}{(T_u + 0,5T)^2}$	$\frac{1}{k_s} \frac{0,5T_n}{T}$

Obrázek 4.3: Seřízení PSD regulátoru z průběhu přechodové charakteristiky

Dosazením za konstanty soustavy  $T_u$ ,  $T_n$  a  $k_s$  a periodu vzorkování  $T = 250 \text{ ms}$  dostáváme:

$$\begin{aligned}
 d_0 &= k_P \doteq 6,93 & (4.11) \\
 d_1 &= \frac{T}{T_I} \approx k_I \doteq 0,01937 \\
 d_1 &= \frac{T_D}{T} \approx k_D \doteq 581,2
 \end{aligned}$$

Na regulátoru E5CK se místo proporcionálního zesílení  $k_P$  nastavuje pásmo proporcionality:

$$p.p. = \frac{1}{k_P} \doteq 0,1443 \quad (4.12)$$

Jako hodnoty parametru p.p. lze v tomto rozsahu zadat pouze čísla s 1 desetinným místem, proto na regulátoru nastavíme hodnotu  $p.p. = \underline{0,1}$  (10%). Tomu odpovídá proporcionální zesílení  $k_P = 10$ .

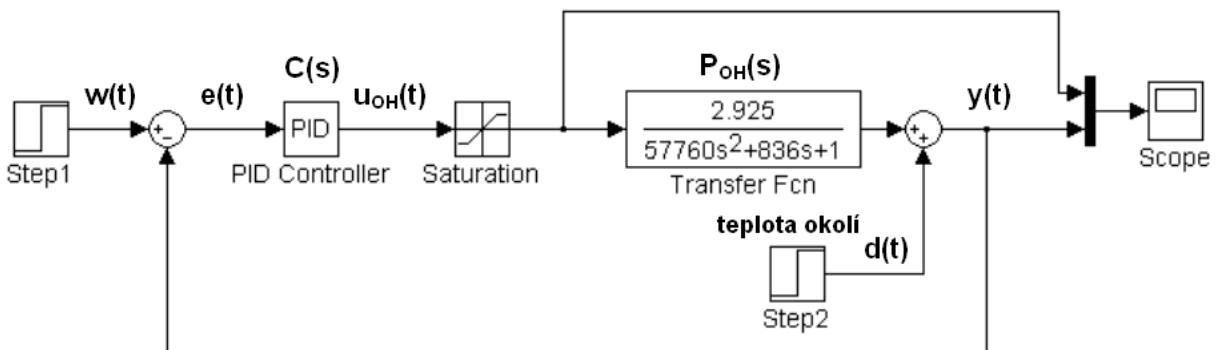
Ze vztahů 4.11 po dosazení za  $T = 250 \text{ ms}$  určíme zbylé stavitelné parametry, které musí být nastaveny v celých sekundách:

$$T_I = 12,904 \text{ s} \rightarrow \underline{13 \text{ s}} \quad (4.13)$$

$$T_D = 145,3 \text{ s} \rightarrow \underline{145 \text{ s}}$$

Takto tedy budou nastaveny konstanty na skutečném regulátoru E5CK. Nyní se pokusíme celý navržený regulační obvod nasimulovat. Simulační schéma se spojitým PID regulátorem je na obrázku 4.4. Zde se využívá zmíněné analogie mezi číslicovou a analognou verzí regulátoru a jsou zde tedy použity konstanty spojitého regulátoru  $k_P = 10$ ,  $k_I = 0.01937$  a  $k_D = 581$ . Přenos tohoto PID regulátoru tedy je:

$$C(s) = 10 + \frac{0,01937}{s} + 581s \quad (4.14)$$



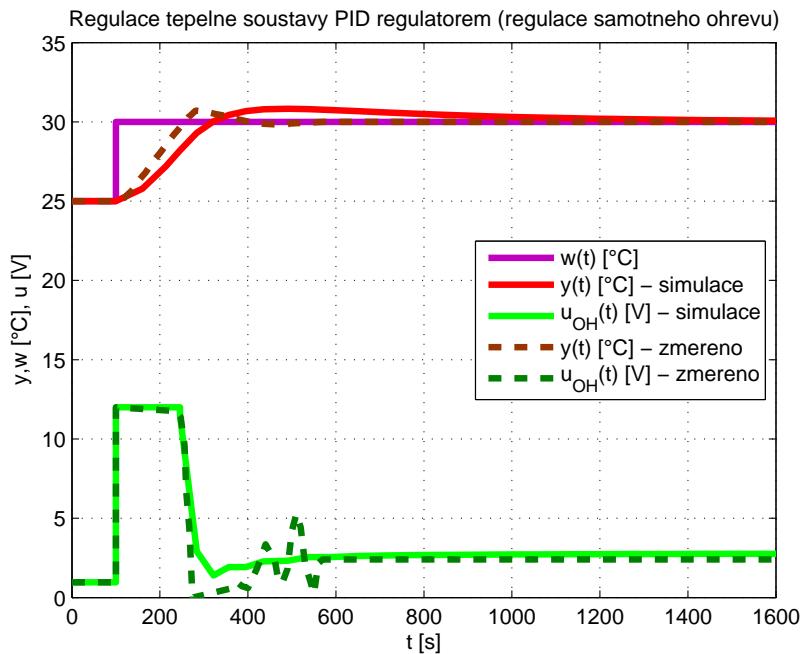
Obrázek 4.4: Simulační schéma pro regulaci teploty pomocí ohřevu

V simulačním schématu se kromě klasických signálů, jako je žádaná hodnota  $w(t)$ , regulační odchylka  $e(t)$ , akční veličina ohřevu  $u_{OH}(t)$  a regulovaná veličina  $y(t)$  objevuje i poruchová veličina  $d(t)$ , kterou představuje nenulová teplota okolí. Ta způsobuje, že pro nulové hodnoty akční veličiny je nenulová regulovaná veličina. Teplota okolí je považována za konstantní a v průběhu celé regulace je nastavena na hodnotu  $21,9 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Dále je v obvodu použit blok Saturace, který má horní limit nastaven na hodnotu 12 a omezuje tak akční

veličinu pro ohřev stejným způsobem, jako je tomu ve skutečnosti, kdy maximální velikost akční veličiny je dána zdrojem napětí 12 V.

Přestože ve skutečnosti do soustavy vstupuje řídicí veličina ve tvaru PWM signálu, v simulaci se pracuje s spojitou hodnotou akční veličiny v rozsahu 0-12 V. Regulátor E5CK totiž zobrazuje na displeji velikost akční zásahu prostřednictvím parametru "Monitor akční veličiny MV (Heat)" v rozsahu hodnot 0-100. Tyto akční zásahy vyjádřené takto procentuálně jsou pak snadno převeditelné do intervalu 0-12 V.

Na obrázku 4.5 jsou vyneseny průběhy regulačního pochodu, kdy byl použit navržený regulátor z rovnice 4.14. Jsou zde porovnány průběhy regulované veličiny a akčního zásahu získané jak simulací v Simulinku, tak reálným pokusem a měřením veličin regulačního obvodu (využitím regulátoru E5CK). Protože by se mohla počáteční teplota (tj. teplota okolí) při reálném řízení teploty pokaždé mírně měnit, byla vždy výstupní teplota regulátorem E5CK nejprve vyregulována na ustálenou teplotu 25 °C a teprve poté byl proveden skok žádané hodnoty z 25 °C na 30 °C. Odezvy na tento skok žádané hodnoty jsou pak znázorněny na obrázku 4.5. (Z důvodu porovnatelnosti jednotlivých návrhů budou stejným způsobem provedeny regulační pokusy se všemi dalšími navrženými regulátory.)



Obrázek 4.5: Regulace tepelné soustavy (ohřev) regulátorem navrženého z P.CH. soustavy

V tabulce 4.2 jsou porovnány nasimulované a změřené hodnoty z hlediska kvality regulace. Z porovnání hodnot je patrné, že výrazný rozdíl je v době ustálení regulované veličiny. Ten je způsoben především tím, že je v simulaci při fázi samovolného chladnutí stále regulována soustava identifikovaná vzhledem k ohřevu. Přitom fáze chladnutí má odlišnou dynamiku (viz. zmínovaný efekt nesymetrické dynamiky u tepelných soustav).

Reálný systém se tedy ochlazuje mnohem rychleji a překmit je při reálné regulaci utlumen dříve. V případě simulace ale i reálné regulace byl potvrzen předpoklad nulové trvalé regulační odchylky při použití PID regulátoru na statický systém druhého rádu.

Parametry kvality regulace	Simulace	Měření
Překmit [%]	16,5	14
Doba ustálení pro $\pm 4\%$ [s]	1050	390
Trvalá regulační odchylka [%]	0	0

Tabulka 4.2: Porovnání simulace a reálného měření (regulátor navržený z P.CH. soustavy)

#### 4.2.2 Návrh regulátoru pomocí geometrického místa kořenů

Návrh regulátoru pomocí GMK je metoda, která vychází z pólů a nul otevřeného regulačního obvodu a na jejich základě pomocí určitých pravidel určuje polohu pólů uzavřeného regulačního obvodu (v závislosti na změně zesílení otevřeného regulačního obvodu). Tato metoda je implementována v Matlabu (Sisotool). To nám snadno umožňuje zvolit polohu pólů a nul hledaného PID regulátoru pro systém tepelné soustavy (ohřev) s přenosem:

$$P_{OH}(s) = \frac{2,925}{57760s^2 + 836s + 1} = \frac{2,925}{(1 + 760s)(1 + 76s)} \quad (4.15)$$

Póly soustavy jsou:

$$p_{s1} = -\frac{1}{760} \doteq -13,2 \cdot 10^{-4}; \quad p_{s2} = -\frac{1}{76} \doteq -0,0132 \quad (4.16)$$

Umístíme například tyto nuly PID regulátoru (a jeden nulový pól):

$$p_{r1} = 0; \quad z_{r1} = -8.22 \cdot 10^{-4}; \quad z_{r2} = -0,0304 \quad (4.17)$$

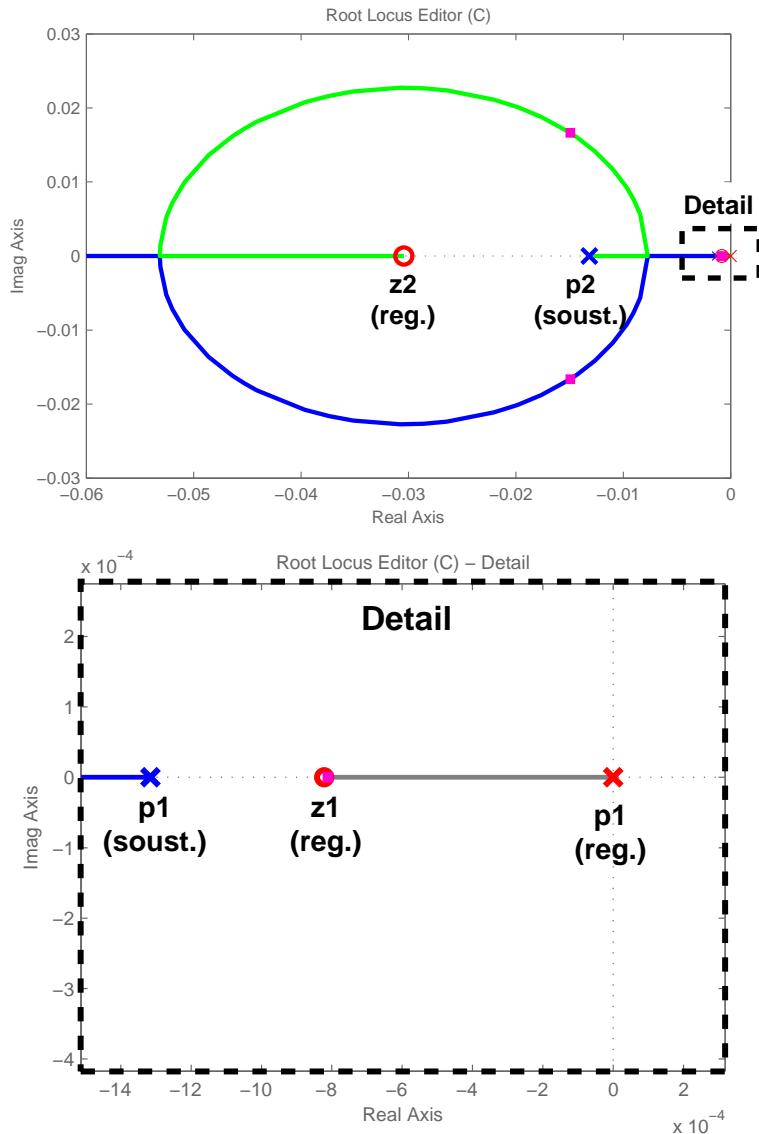
Geometrické místo kořenů je potom nakresleno na obrázku 4.6. Křížky zde značí póly otevřeného obvodu, kroužky nuly otevřeného obvodu a čtverečky póly uzavřeného obvodu.

Přenos spojitého PID regulátoru lze pro metodu GMK nejlépe vyjádřit takto:

$$C(s) = k_p + \frac{k_I}{s} + k_D s = \frac{k_D \left( s^2 + \frac{k_p}{k_D} s + \frac{k_I}{k_D} \right)}{s} = \frac{k_D (s + \omega_I)(s + \omega_D)}{s} \quad (4.18)$$

Dosazením za zvolené nuly PID regulátoru  $z_{r1} = \omega_I = -8.22 \cdot 10^{-4}$ ,  $z_{r2} = \omega_D = -0,0304$  a zvolené zesílení  $k_D = 320$  dostáváme přenos navrženého spojitého PID regulátoru:

$$C(s) = \frac{320(s + 8.22 \cdot 10^{-4})(s + 0,0304)}{s} = 10 + \frac{0,008}{s} + 320s \quad (4.19)$$

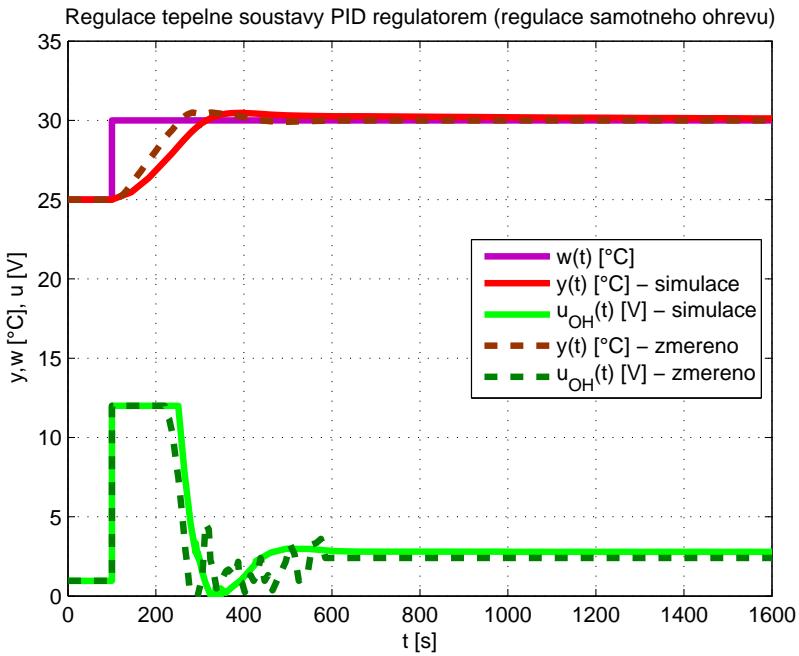


Obrázek 4.6: Geometrické místo kořenů

Stavitelné parametry regulátoru E5CK se nyní stanoví pomocí přepočetních vztahů 4.9 jako:

$$\begin{aligned}
 k_p &= 10 \quad (p.p. = \underline{0, 1}) \\
 k_I &= \frac{T}{T_I} \Rightarrow T_I = \frac{T}{k_I} = \frac{0,25}{0,008} = 31,25 \text{ s} \rightarrow \underline{31 \text{ s}} \\
 k_D &= \frac{T_D}{T} \Rightarrow T_D = k_D T = 320 \cdot 0,25 = \underline{80 \text{ s}}
 \end{aligned} \tag{4.20}$$

Simulační schéma bude stejné jako v minulém návrhu (obrázek 4.4). Průběhy regulace ohřevu tepelné soustavy při použití regulátoru navrženého pomocí GMK jsou na obrázku 4.7. Je zde opět vynesena simulace společně se skutečným měřením na reálném procesu. V tabulce 4.3 jsou pak porovnány nasimulované a změřené hodnoty z hlediska kvality regulace.



Obrázek 4.7: Regulace tepelné soustavy (ohřev) regulátorem navrženým pomocí GMK

Parametry kvality regulace	Simulace	Měření
Překmit [%]	9,4	10
Doba ustálení pro $\pm 4\%$ [s]	805	320
Trvalá regulační odchylka [%]	0	0

Tabulka 4.3: Porovnání simulace a reálného měření (regulátor navržený pomocí GMK)

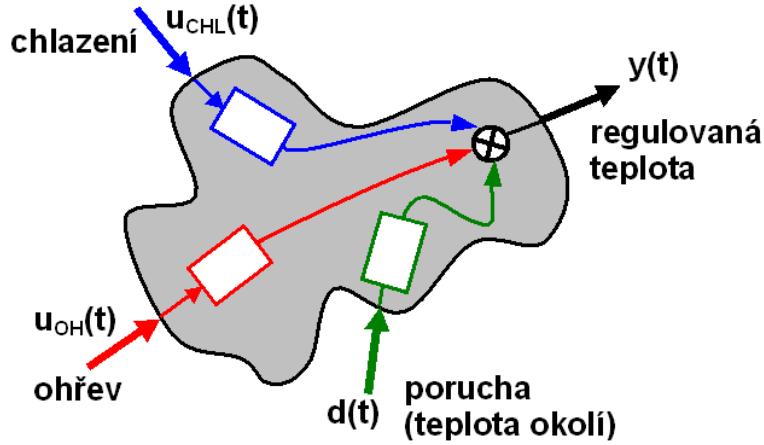
Oproti minulému návrhu regulátoru se při řízení teploty regulátorem navrženým pomocí GMK snížila velikost překmitu. Doba regulace pro pásmo  $\pm 4\% = \pm 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$  od ustálené hodnoty je také o něco kratší.

### 4.3 Návrh regulátoru pro ohřev a chlazení

V souvislosti s regulací teploty pomocí ohřevu a chlazení je nutné připomenout již několikrát zmiňovaný nepříjemný rys tepelných soustav. Jedná se o to, že řízený systém vykazuje velkou **nesymetrii v dynamice** pro režim topení a chlazení. Tato nesymetrie potom způsobuje značné problémy při návrhu PID regulátoru, který by procesy s topením a chlazením uměl spolehlivě řídit. Pro řízení teploty pomocí ohřevu a chlazení se bude využívat obou akčních výstupů regulátoru E5CK (OUT1 = Heat, OUT2 = Cool).

Návrhem regulátoru pro procesy s topením a chlazením se zabývá článek [3], ze kterého se bude v této části častečně vycházet.

Model soustavy s řízeným ohřevem a chlazením je naznačen na obrázku 4.8. Stejně jako v případě tepelné soustavy navržené v kapitole 2 uvažujeme těleso, na které v určité části působí ohřev  $u_{OH}(t)$  a chlazení  $u_{CHL}(t)$ . Dále ovšem na tuto soustavu působí rovněž teplota okolí, která je označena jako poruchová veličina  $d(t)$ . Úkolem je řídit výstupní teplotu  $y(t)$  pomocí ohřevu a chlazení tak, aby bylo dosaženo co možná nejlepší kvality regulace a sledování žádané hodnoty bez trvalé regulační odchylky.



Obrázek 4.8: Regulace teploty pomocí ohřevu a chlazení

V tomto případě platí princip superpozice a lze tedy napsat:

$$Y(s) = P_{OH}(s)U_{OH}(s) + P_{CHL}(s)U_{CHL}(s) + D(s) \quad (4.21)$$

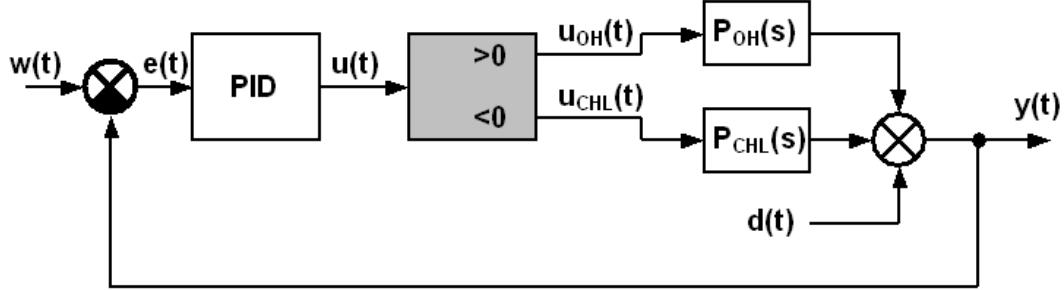
kde  $P_{OH}(s)$  a  $P_{CHL}(s)$  označují přenosy (identifikované v kapitole 2.3) z místa ohřevu a chlazení do místa regulované teploty.

Pokud máme pro řízení k dispozici pouze jediný PID regulátor s rozdělenou akční veličinou, budeme muset při teoretickém návrhu uvažovat místo dvou akčních veličin  $u_{OH}(t)$  a  $u_{CHL}(t)$  pouze jedinou akční veličinu regulátoru  $u(t)$  s rozděleným rozsahem. Tento rozsah potom definuje akční veličiny  $u_{OH}(t)$  a  $u_{CHL}(t)$  takto:

$$\begin{aligned} u_{OH}(t) &= u(t), & u_{CHL}(t) &= 0 && \text{pro } u(t) \geq 0 \\ u_{OH}(t) &= 0, & u_{CHL}(t) &= u(t) && \text{pro } u(t) < 0 \end{aligned} \quad (4.22)$$

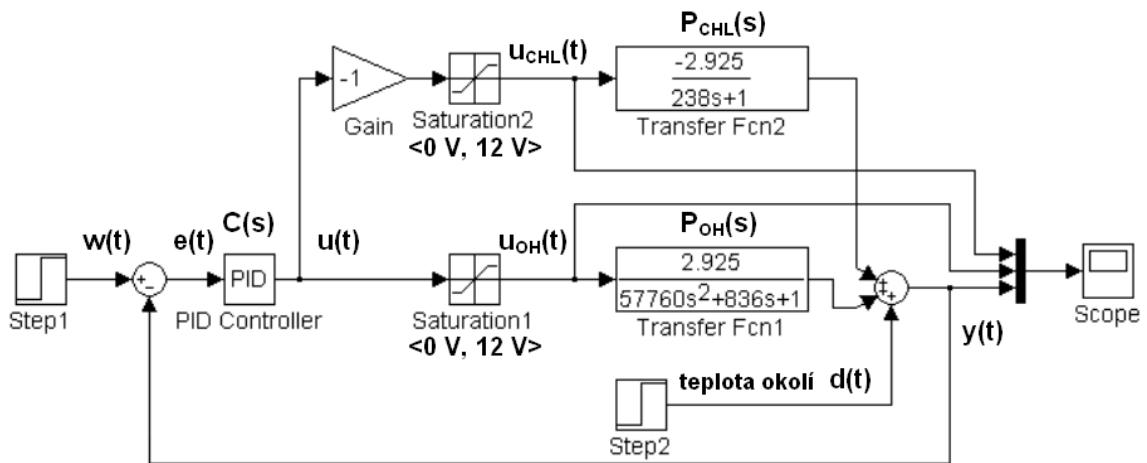
Toto rozdělení akční veličiny zaručí, že se neohřívá a nechladí současně. Princip rozdělení akční veličiny na signály ohřevu a chlazení je patrný na obrázku s regulační smyčkou 4.9. Teoreticky lze tedy navrhovat standardní PID regulátor pro soustavu řízenou jedním vstupem  $u(t)$  (namísto dvěma vstupy). Protože ale přenos pro ohřev  $P_{OH}(s)$  má jiné dynamické vlastnosti než přenos pro chlazení  $P_{CHL}(s)$ , je zřejmé, že PID regulátor naladěný pro fázi ohřevu nevyhovuje pro fázi chlazení. V regulační smyčce na obrázku 4.9 totiž musí PID regulátor střídavě pracovat s odlišnými řízenými soustavami a jeho rozumné seřízení pro obě soustavy najednou je velmi komplikované a teoreticky neproveditelné. Protože

se ale v simulacích bude fáze chlazení uplatňovat především při potlačování překmitu regulované teploty (při překročení žádané hodnoty), bude navržen regulátor primárně pro fázi ohřevu. Potlačení překmitu pomocí chlazení proběhne poměrně rychle a poté regulace automaticky opět přejde do fáze ohřevu.



Obrázek 4.9: Regulační smyčka s rozdělenou akční veličinou na signály ohřevu a chlazení

Skutečné provedení simulačního zapojení pro regulaci teploty pomocí ohřevu a chlazení je na obrázku 4.10. Pokud PID regulátor generuje kladnou hodnotu akčního zásahu  $u(t)$ , je řízena pouze soustava představující ohřev (při omezení akčního zásahu do 12 V). V kanálu chlazení je kladná velikost akčního zásahu znegována (zesílením -1) a tím pádem saturace (s nastavenýmimezemi na 0 V a 12 V) již nepropustí tento signál k systému  $P_{CHL}(s)$  představující chlazení. Při záporném akčním zásahu  $u(t)$  je naopak řízena pouze fáze chlazení. Tím je zaručeno přepínání režimů ohřevu a chlazení.



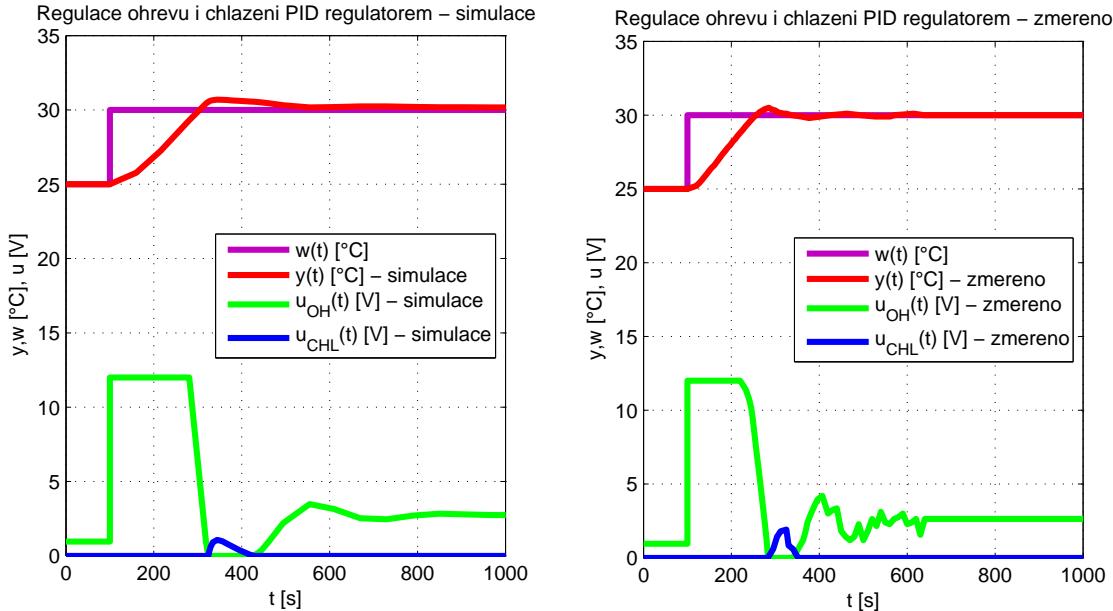
Obrázek 4.10: Simulační schéma pro regulaci teploty pomocí ohřevu a chlazení

Navržený regulátor pro řízení ohřevu a chlazení má podobný přenos jako regulátor pro samotný ohřev navržený pomocí GMK (rovnice 4.19). Liší se pouze velikostí derivační složky:

$$C(s) = 10 + \frac{0,008}{s} + 28s \quad (4.23)$$

Pomocí analogie mezi spojitým a číslicovým PID regulátorem (vztahy 4.9) se získají stavitelné parametry regulátoru E5CK  $\rightarrow k_p = 10$  (p.p. = 0, 1);  $T_I = 31\text{ s}$ ;  $T_D = 7\text{ s}$ .

Průběhy regulace teploty pomocí ohřevu a chlazení jsou vyneseny na obrázku 4.11. Tabulka 4.4 opět porovnává nasimulované a změřené hodnoty z hlediska kvality regulace.



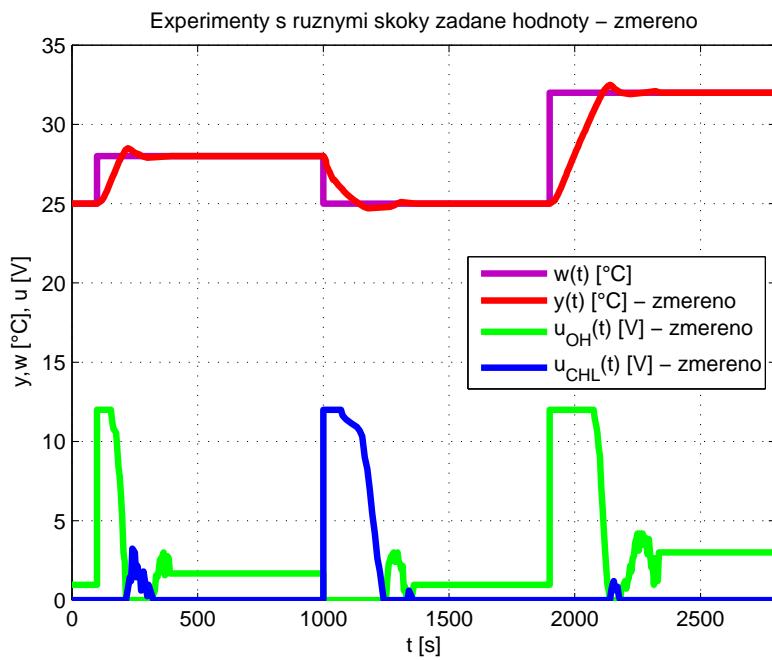
Obrázek 4.11: Regulace tepelné soustavy pomocí ohřevu a chlazení (simulace a realita)

Parametry kvality regulace	Simulace	Měření
Překmit [%]	13,8	10
Doba ustálení pro $\pm 4\%$ [s]	444	277
Trvalá regulační odchylka [%]	0	0

Tabulka 4.4: Porovnání simulace a reálného měření (regulace pomocí ohřevu a chlazení)

Ze simulace i z reálného měření je patrné, že oproti případu regulace pomocí samotného ohřevu (GMK návrh) došlo při použití druhé akční veličiny (chlazení) k podstatnému urychlení regulace.

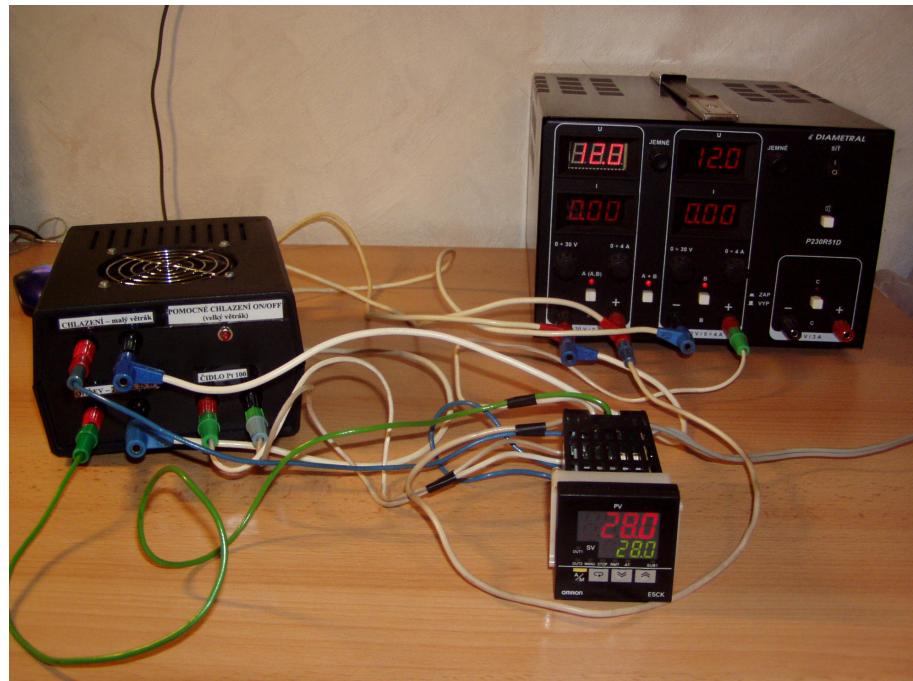
Přestože teoretický návrh PID regulátoru s rozdělenou akční veličinou není příliš vhodný a obecně ani nelze navrhnout jediný PID regulátor, který bude vhodně seřízen jak pro fázi ohřevu, tak pro fázi chlazení, reálné nasazení regulátoru E5CK (nastaveného v režimu PID) vypovídá o více než uspokojivé kvalitě regulace. O tom svědčí i následující experiment na obrázku 4.12 provedený se skutečnou tepelnou soustavou, kdy bylo postupně provedeno několik skoků žádané (zvýšení i snížení žádané hodnoty) a sledoval se průběh regulované teploty a velikost akčních veličin. Přesný způsob, jakým ve skutečnosti regulátor E5CK při využívání obou výstupů (OUT1 = Heat a OUT2 = Cool) určuje velikost akčních zásahů pro ohřev a chlazení, však výrobce tohoto regulátoru tají.



Obrázek 4.12: Regulace tepelné soustavy pomocí ohřevu a chlazení - skoky žádané hodnoty

## 4.4 Celkový pohled na realizovaný regulační obvod

Na obrázku 4.13 je zachyceno celkové provedení regulačního obvodu pro regulaci teploty, se kterým se pracovalo při testování všech navržených PID regulátorů.



Obrázek 4.13: Celkový pohled na realizovanou úlohu pro regulaci teploty

# Kapitola 5

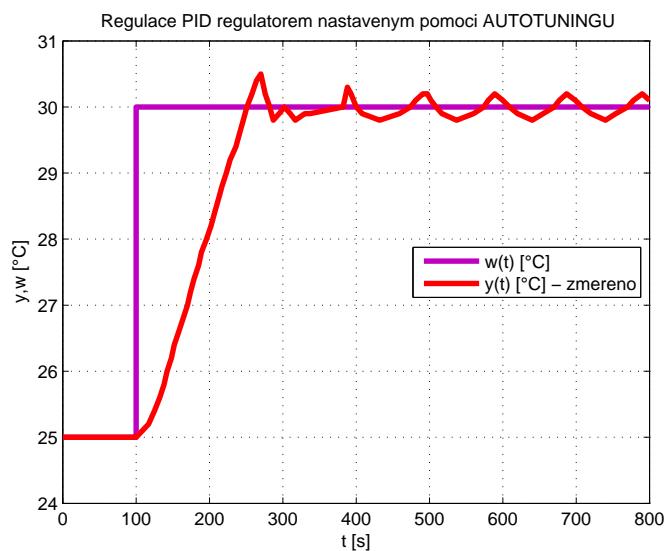
## Doplňkové experimenty s regulačním obvodem

### 5.1 Test autotuningu regulátoru E5CK

Funkci automatického ladění regulátoru E5CK (popsaného v kapitole 3.3.4) lze ovlivňovat pomocí parametru "Vypočtený zisk AT" (parametr Expanzního módu - viz. 3.3.7). Pokud je nastavená hodnota tohoto parametru nižší než 1, bude při hledání stavitelných parametrů pomocí automatického ladění více upřednostňována rychlosť regulace. Naopak zvýšením této hodnoty (do intervalu od 1 do 10) se upřednostní stabilita.

Po provedení autotuningu s využitím implicitní hodnoty (1,0) parametru "Vypočtený zisk AT" regulátor nalezl a uložil tyto stavitelné parametry:

$$k_P = 10 \quad (\text{p.p.} = \underline{0}, \underline{1}) ; \quad T_I = \underline{5} \text{ s} ; \quad T_D = \underline{3} \text{ s} \quad (5.1)$$

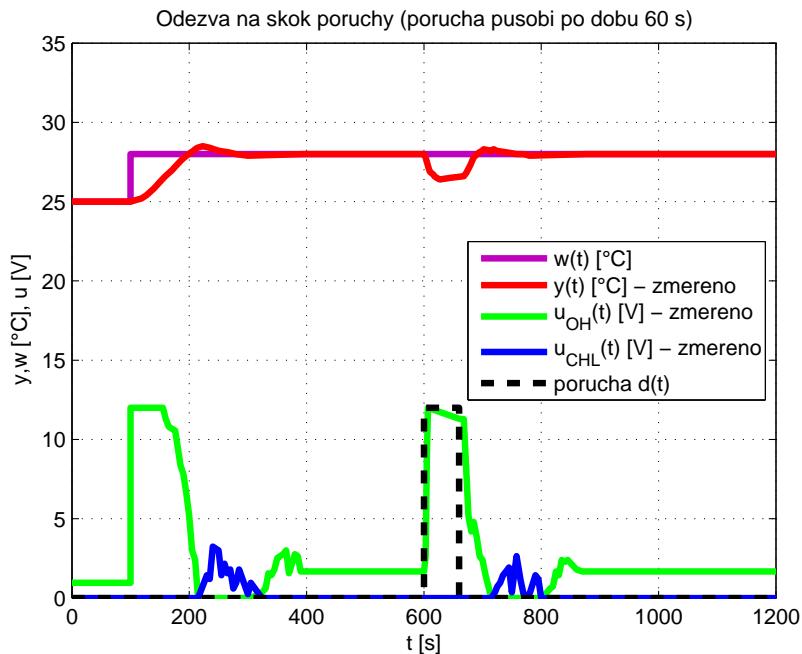


Obrázek 5.1: Regulace tepelné soustavy PID regulátorem nastaveným autotuningem

Průběh regulace při aplikaci těchto hodnot PID regulátoru je na obrázku 5.1. Z tohoto průběhu je ale patrné, že využití funkce automatické ladění nepřineslo příliš uspokojivé výsledky, neboť regulovaná teplota při použití takto nastaveného regulátoru neustále kmitá v pásmu  $\pm 0,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  od žádané hodnoty a není tedy narozený od předchozích návrhů regulátorů dosaženo požadované teploty.

## 5.2 Testování vlivu poruchy

Při tomto pokusu je využit regulátor navržený pro řízení teploty pomocí ohřevu a chlazení (přenos 4.23). Nejprve je proveden skok žádané hodnoty z  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$  na  $28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Po ustálení regulované teploty na  $28 \text{ }^{\circ}\text{C}$  se nechá na teplenu soustavu působit porucha  $d(t)$ , kterou představuje zapnutí prudkého ochlazování vyvolaného "velkým" větrákem po dobu 60 s. Odezva regulátoru na tuto poruchu je patrná z obrázku 5.2. Zde je vidět, že regulátor reaguje na poruchu prakticky okamžitým zapnutím ohřevu na maximální výkon. Po uplynutí doby, po kterou porucha působí, se regulovaná teplota dostane zpět na žádanou hodnotu  $28 \text{ }^{\circ}\text{C}$  zhruba do 50 s. Reakce regulátoru na vyvolanou poruchu je tedy poměrně vyhovující.

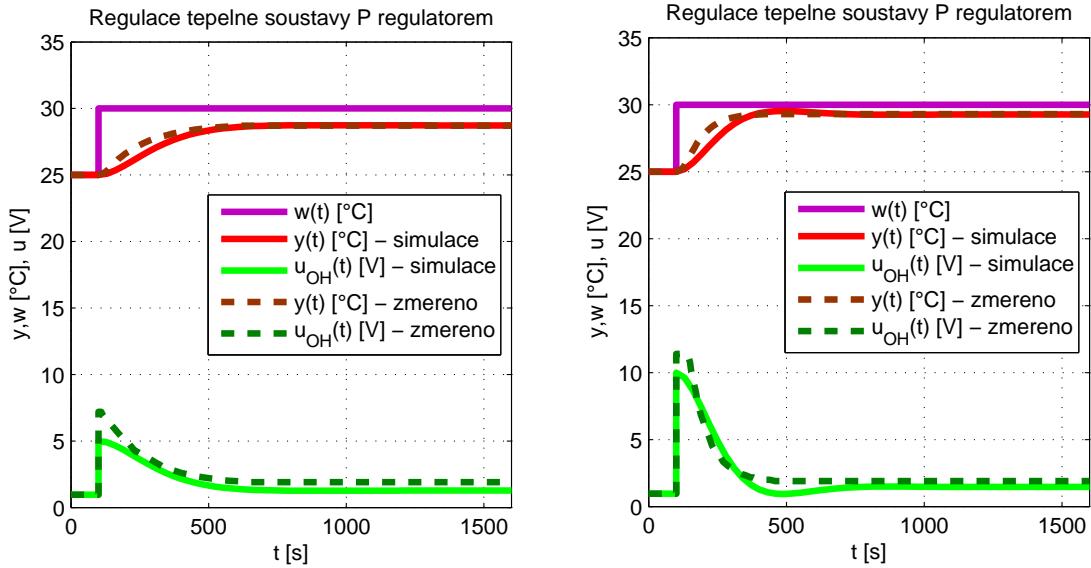


Obrázek 5.2: Odezva na skok poruchy - porucha působí po dobu 60 s

## 5.3 Experimenty s P regulátorem

Pokud bychom z nějakého důvodu chtěli místo PID regulátoru k řízení použít obyčejný P regulátor, lze takovou situaci otestovat i s regulátorem E5CK, u kterého se potlačí

integrační a derivační složka a ponechá se pouze proporcionalní zesílení regulátoru. V tomto případě je ale zřejmé, že při řízení statického systému (2. rádu) bude P regulátor regulovat s trvalou regulační odchylkou. Průběhy regulací pro 2 různá zesílení  $k_P$  jsou na obrázku 5.3. Je zde opět porovnána simulace v Simulinku s reálným měřením.



Obrázek 5.3: Regulace tepelné soustavy P regulátorem - a)  $k_P = 1$  b)  $k_P = 2$

Tabulka 5.1 porovnává nasimulované a změřené hodnoty pro 2 různá zesílení "P regulátoru".

$k_P = 1:$	Simulace	Měření	$k_P = 2:$	Simulace	Měření
$y(\infty)$ [°C]	28,73	28,7	$y(\infty)$ [°C]	29,27	29,3
$e(\infty)$ [%]	25,4	26	$e(\infty)$ [%]	14,6	14

Tabulka 5.1: Porovnání simulace a reálného měření (regulace P regulátorem)

# Kapitola 6

## Závěr

Výsledkem této práce bylo vytvoření použitelného řídicího systému pro regulaci teploty. V úvodu byl nejprve navrhnut a realizován model tepelné soustavy, který byl i následně matematicky popsán. Návrh tepelné soustavy se soustředil na vhodnou volbu ohřevu, chlazení a čidla teploty a jejich následné umístění. Při hledání matematického popisu vzhledem k ohřevu bylo využito modelování pomocí tepelných kapacit a rezistorů. Díky provedené experimentální identifikaci tohoto systému se určily přenosy tepelné soustavy, které se dále využívaly při návrzích regulátorů.

Zvláštností realizované tepelné soustavy je to, že má pouze 1 výstup (řízenou teplotu) ale 2 vstupy (vstupní napětí pro rezistorový ohřev a napětí malého větráčku). Jedná se tedy o systém s větším počtem vstupů než výstupů. Pro zjednodušení návrhu a s ohledem na možnosti regulátoru E5CK od firmy Omron, který byl pro tuto úlohu k dispozici, bylo stanoveno omezení na současné řízení pouze jednoho vstupu tepelné soustavy. Regulátor E5CK totiž v režimu PID řízení sice poskytuje regulaci pomocí 2 svých výstupů - pro řízení ohřevu (OUT1 = Heat) a chlazení (OUT2 = Cool), ale v jednom okamžiku provádí akční zásah pouze jeden z nich.

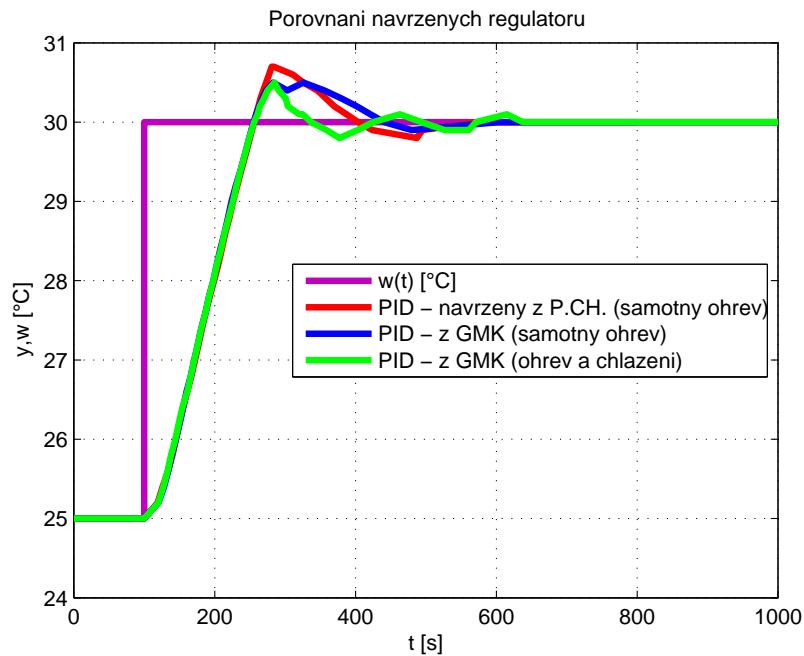
Výraznou komplikací návrhu řízení bylo asymetrické chování při ohřevu a chlazení. To je pro tepelné soustavy typické. Fáze ohřevu měla odlišnou dynamiku než fáze chlazení. Proto bylo potřeba systém rozdělit na dva subsystémy a pro ty navrhnout vhodné řízení. Při návrhu řízení musela být také uvažována nenulová teplota okolí. Ta představovala poruchu působící na výstup soustavy a pro zjednodušení se považovala vždy za konstantní.

Přestože přesný matematický vzorec PID algoritmu ústředního členu digitálního regulátoru E5CK je "know-how" firmy Omron, podařilo se nasimulovat regulační obvod a navrhnout regulátory, které je možné realizovat prostřednictvím stavitelných parametrů regulátoru E5CK. Využilo se zde analogie mezi spojitým PID regulátorem a jeho číslicovou podobou. Při teoretických simulacích v Matlabu-Simulinku se využívalo metod spojitého návrhu PID regulátoru a pro následnou reálnou aplikaci regulátoru E5CK se přešlo na číslicovou podobu PID, který má navíc ještě nastavitelnou periodu vzorkování  $T$ .

V první části návrhu regulátoru se řídil pouze ohřev tepelné soustavy. V tomto případě tedy PID regulátor vyřeší případný překmit regulované teploty tak, že sníží akční zásah

ohřevu na minimum a nechá soustavu samovolně ochladit. Pro tento způsob regulace byly navrženy 2 různé PID regulátory. Stavitelné parametry prvního regulátoru se odvodili z přechodové charakteristiky ohřevu soustavy. Druhý regulátor byl navržen pomocí metody GMK.

Další část návrhu regulátoru se už zabývala řízením soustavy pomocí ohřevu a chlazení. Zde bylo užito metody, kdy se akční veličina navrhovaného PID regulátoru rozdělila podle znaménka akčního zásahu na řízení ohřevu a řízení chlazení. Při kladné hodnotě akčního zásahu se pracovalo pouze se systémem pro ohřev, naopak při záporné hodnotě pouze se systémem chlazení. Přestože tato úvaha není teoreticky příliš správná, neboť nelze navrhnout regulátor, který bude vyhovovat těmto dvěma poměrně odlišným systémům, reálné nasazení regulátoru E5CK svědčí o tom, že použitelná je. Při skutečné regulaci totiž dokáže tento kompaktní regulátor (pracující v režimu jednoho PID) uspokojivě řídit fázi ohřevu i případnou fázi chlazení. Porovnání navržených regulátorů pro regulaci teploty pomocí samotného ohřevu i ohřevu a chlazení je na obrázku 6.1.



Obrázek 6.1: Porovnání navržených regulátorů pro regulaci teploty - reálné měření

Z těchto průběhů je zřejmé, že regulátor navržený pro regulaci teploty pomocí ohřevu a chlazení dosahuje nejlepších výsledků z hlediska kvality regulace. S tímto regulátorem se dosahuje překmitu regulované veličiny pouze 10% a doba regulace je nejkratší (pro pásmo  $\pm 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$  od ustálené hodnoty je přibližně 280 s). Je totiž jasné, že nevyužití druhého akčního výstupu pro chlazení vede při překmitu k samovolnému chladnutí vyhřívaného tělesa a tedy delší době regulace.

V závěru práce bylo také vyzkoušeno, že navržený regulátor PID pro regulaci teploty pomocí ohřevu a chlazení reaguje vhodně i na poruchu způsobenou zapnutím prudkého

externího chlazení (větší větrák).

Možnost budoucího rozšíření této regulační úlohy vidím v doplnění regulátoru E5CK Omron o volitelnou komunikační jednotku se sériovým rozhraním (RS-232C nebo RS-485). Díky této jednotce by mohlo probíhat celé řízení (monitoring a nastavování parametrů regulátoru) přes osobní počítač, což by bylo užitečné především z hlediska vyhodnocování a archivace průběhů regulačních pochodů.

# Literatura

- [1] *Digitální regulátor E5CK Omron - Datasheet* [online] (2008).  
⟨<http://industrial.omron.cz/cs/products/catalogue/default.html>⟩
- [2] J. BALÁTĚ: *Automatické řízení*. Technická literatura BEN, Praha, 2003.  
ISBN 80-7300-020-2.
- [3] M. SCHLEGEL, J. MERTL: *Nový regulátor pro procesy s topením a chlazením*. Sborník konference Automatizace, regulace a procesy 2006, Brno.
- [4] P. RIPKA, S. ĎAD'Ó, M. KREIDL, J. NOVÁK: *Senzory a převodníky*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 2005. ISBN 80-01-03123-3.
- [5] P. HORÁČEK: *Systémy a modely*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 1999.  
ISBN 80-01-01923-3.
- [6] *Nové algoritmy pro regulaci teploty* [online] (2008). Západočeská univerzita v Plzni, Katedra kybernetiky.  
⟨<http://www.kky.zcu.cz/cs/research-fields/temperature-control>⟩
- [7] T. KOSTKA: *Elektrotepelná technika* [online] (2008).  
⟨<http://www.volny.cz/kostka2000/tепло.htm>⟩
- [8] J. FUKA, J. JOHN, M. KUTIL: *Učebnice SARI* [online] (2008).  
⟨[http://dce.felk.cvut.cz/sari/download/sam/identifikace\\_skripta.pdf](http://dce.felk.cvut.cz/sari/download/sam/identifikace_skripta.pdf)⟩
- [9] *Přednášky k předmětu Instrumentace procesů - Číslicové regulátory* [online] (2008).  
⟨[http://dce.felk.cvut.cz/ip/prednasky/Cislicove\\_regulatory.ppt](http://dce.felk.cvut.cz/ip/prednasky/Cislicove_regulatory.ppt)⟩
- [10] K. HYNIOVÁ, A. STŘÍBRSKÝ: *Instrumentace procesů - Návody ke cvičení*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 1996. ISBN 80-01-01503-3.
- [11] P. KLÁN: Moderní metody nastavení PID regulátorů. *Automa*, ročník 2000, č. 9, str. 54
- [12] *The Mathworks* [online] (2008).  
⟨<http://www.mathworks.com/>⟩

# Příloha A

## Obsah přiloženého CD

K této práci je přiloženo CD, na kterém jsou uloženy zdrojové kódy pro Matlab-Simulink a další podpůrné soubory.

- Adresář **Dokumentace** - zde je uložen tento dokument bakalářské práce ve formátu pdf, originální zadávací formulář, prohlášení o samostatném zpracování, dále pak datasheet k regulátoru E5CK.
- Adresář **Fotogalerie** - zde jsou uloženy fotografie pořízené při realizaci tepelné soustavy, zapojování regulátoru E5CK a konečném testováním s regulačním obvodem.
- Adresář **Identifikace** - zde jsou uloženy zdrojové kódy a data pro Matlab, které souvisí s kapitolou Experimentální identifikace tepelné soustavy.
- Adresář **Regulace** - zde jsou uloženy zdrojové kódy a data pro Matlab a Simulink, které souvisí s kapitolou Návrh a realizace řízení a Doplňkové experimenty s regulačním obvodem.