

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra aplikované kybernetiky



Obor

3902T021 Automatizované systémy řízení ve strojírenství

Zaměření

Automatizace inženýrských prací

**Programový modul pro automatické seřízení regulátoru
teplé užitkové vody**

Autor:

Pavel Francírek

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Michal Moučka, Ph.D.

Konzultant diplomové práce:

Liberec 2010

Zde vložte zadání

ANOTACE
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ

Katedra aplikované kybernetiky

Studijní program: M2301 Strojní inženýrství
Obor: 3902T021 Automatizované systémy řízení ve strojírenství
Zaměření: Automatizace inženýrských prací
Diplomant: Pavel Francírek
Téma práce: Programový modul pro automatické seřízení regulátoru teplé užitkové vody
Theme of work: Software Module for Automatically Adjusting Hot Water Regulator
Rok obhajoby DP: 2010
Vedoucí DP: Ing. Michal Moučka, Ph.D.

Anotace:

Cílem této diplomové práce je vytvořit podprogram do již zavedené obslužné aplikace laboratorní úlohy. Tento modul automaticky identifikuje probíhající proces a nastaví parametry pro následnou regulaci. Aplikace obsahuje část identifikační a část regulační. Tyto části jsou navzájem propojeny a předávají si informace o soustavě. Celá laboratorní úloha pak slouží jako učební pomůcka pro studenty předmětu Základy aplikované kybernetiky.

Annotation:

The main goal of this graduation thesis is creating a subprogram in to the using service application in laboratory task. This module is used for automatic identification of the running process, which set-up parametres for next regulation. Application includes part of identification and part of regulation. These parts are respective connected and transmits information about system. Whole laboratory task is used for teaching students in subject Basics of Applied Cybernetics.

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Obsah

1 Úvod	8
2 Teplená soustava.....	9
2.1 Tepelné hospodářství	9
2.2 Laboratorní model tepelného hospodářství	10
3 Hierarchie a funkce obslužné aplikace	16
4 Identifikace soustavy	18
4.1 Podprogram Automatické seřízení regulátoru	19
4.1.1 Příprava měření	20
4.1.2 Měření	21
4.1.3 Výpočet parametrů	21
4.2 Vyhodnocení.....	22
4.2.1 Metoda ploch.....	22
4.2.2 Metoda nejmenších čtverců.....	25
5 Regulace	28
5.1 Metoda výpočtu regulačních parametrů	29
6 Automatická identifikace	30
6.1 Určení typu přenosu.....	30
6.2 Metoda ploch	35
6.3 Metoda nejmenších čtverců	37
6.4 Porovnání výsledků	39
7 Závěr	41
Seznam literatury	42
Přílohy na CD	43

Seznam symbolů

A_0	výpočtová plocha nad křivkou [Vs]
A_1	výpočtová plocha pod křivkou [Vs]
a	koeficient filtrace [-]
$d_1(t), d_2(t)$	poruchové veličiny [V]
$dh_{\max}$	maximální hodnota směrnice [V]
$dh(t)$	1. derivace přechodové charakteristiky v daném časovém okamžiku [V]
e	Eulerovo číslo [-]
$e(t)$	regulační odchylka [V]
$e^2(k)$	kvadrát odchylky [V ²]
$h(t)$	bod na přechodové charakteristice v daném čase [V]
$h(kT)$	výstupní veličina v časovém okamžiku kT [V]
$h_f(kT)$	filtrovaná vstupní veličina v časovém okamžiku kT [V]
h_i	změřená hodnota přechodové charakteristiky [V]
h_{Mi}	vypočítaná hodnota přechodové charakteristiky [V]
$G(s)$	přenos systému [-]
$H(s)$	Laplaceův obraz [-]
K	zesílení procesu [V]
K_C	proporcionální zesílení regulátoru [-]
N	počet změřených hodnot [-]
$p_{10}(t)$	klouzavý průměr z deseti hodnot [V]
s	komplexní proměnná Laplaceova obrazu [-]
T	časová konstanta [s]
T_0	počáteční teplota měření [°C]
T_{ar}	průměrná doba zdržení [s]
T_d	dopravní zpoždění přenosu [s]
T_I	integrační časová konstanta regulátoru [s]
T_V	teplota vypnutí měření [°C]

τ	normalizované dopravní zpoždění [-]
t	čas [s]
Δt	perioda vzorkování [s]
U_v	otevření ventilu [V]
u_v	otevření ventilu [%]
$u(t)$	akční veličina [V]
$w(t)$	řídící veličina [V]
$y(t)$	regulovaná veličina [V]

1 Úvod

Laboratorní úlohy mají za úkol přiblížit studentům probíranou látku. Čím více se modelová představa blíží reálné situaci, tím je přínos pro studium větší. Takovým příkladem názorné laboratorní úlohy je model ohřevu teplé užitkové vody (TUV) v laboratořích Automatizovaných systémů řízení (ASŘ), jehož identifikace a regulace je řešena v této diplomové práci.

Procesy ohřevu vody a regulace její teploty jsou dnes nedílnou součástí každé domácnosti. Uživatel takového zařízení nastaví pouze požadovanou teplotu na termostatu, resp. bojleru a dále se o daný problém nestará. Vše ostatní se děje automaticky. Ovšem je třeba si uvědomit, že nejdříve musí být regulátory správně nastaveny, nejlépe pro každou tepelnou soustavu (domácnost) zvlášť.

Tato diplomová práce má za cíl vytvořit programový modul pro automatické seřízení regulátoru teplé užitkové vody, který bude umět identifikovat soustavu a nastavit regulační parametry, pro různé případy tepelných soustav zvlášť.

Programový modul se skládá ze dvou částí. Nejprve je nutno soustavu identifikovat a změřit její parametry. V této práci byly k získání matematického modelu regulované soustavy použity dvě metody identifikace, které je možné mezi sebou porovnat. Druhou částí je pak určení stavitelných parametrů regulátoru pro získaný model a následné praktické ověření správnosti identifikace a nastavení regulátoru.

2 Teplená soustava

2.1 Tepelné hospodářství

Pojmem *tepelné hospodářství* se rozumí systém, starající se o ohřev teplé užitkové vody, rozvod této vody do požadovaných míst a udržování zadané teploty. Nejjednodušším případem pro představu je soustava nacházející se v běžném rodinném nebo panelovém domu.

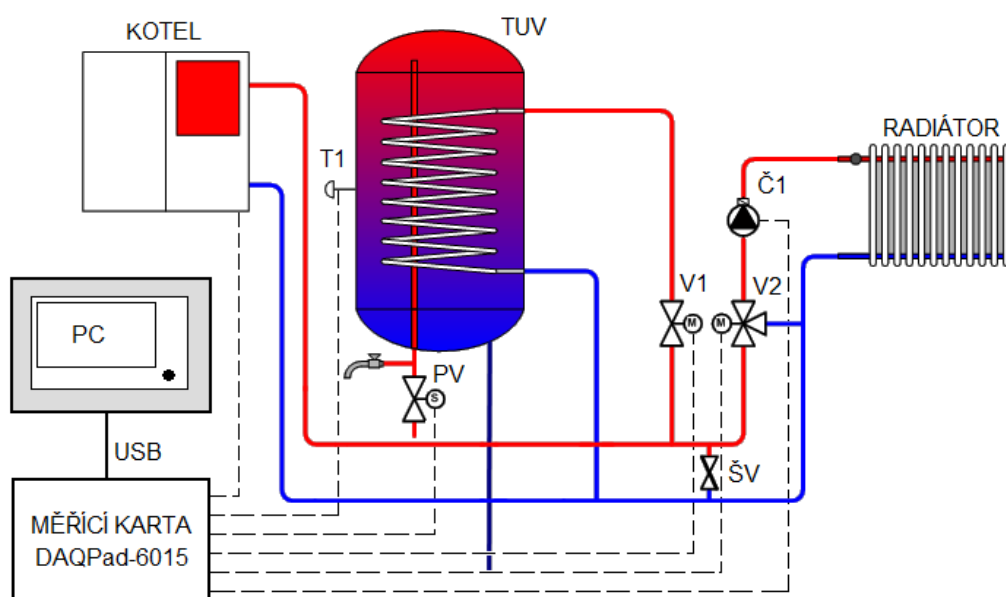
Kde kotel (plynový, na tuhá paliva, elektrický, atd.) ohřívá médium, v našem případě vodu, které pak slouží k ohřevu TUV v bojleru. Ohřáté médium se zároveň používá k vytápění místností pomocí radiátorů. Tuto sestavu dále doplňují nezbytné prvky, kterými jsou čerpadla pro zajištění koloběhu vody, pojistné, škrtící a regulační ventily, teploměry a neméně důležité odvzdušňovací ventily.



Obr. 2.1: Laboratorní model soustavy tepelného hospodářství

2.2 Laboratorní model tepelného hospodářství

Model soustavy tepelného hospodářství (obr. 2.2), jenž se nachází v prostorách laboratoře ASŘ, slouží jako pomůcka pro výuku předmětu Základy aplikované kybernetiky, který je součástí studia třetího ročníku na Fakultě strojní nebo pro navazující předměty v rámci zaměření oboru ASŘ [5].



Obr. 2.2: Schéma soustavy tepelného hospodářství

Celý model lze rozdělit do třech částí. První část se stará o ohřev a rozvod vody, druhá část je zaměřena na regulaci deskového radiátoru a část třetí, kterou se zabývá tato diplomová práce, je věnována regulaci teploty teplé užitkové vody v bojleru.

Srdcem soustavy tepelného hospodářství je elektrický kotel (KOTEL). Ohřevem vody dodává do soustavy energii, která je využívána pro vytápění deskového radiátoru a k ohřívání teplé užitkové vody v bojleru (TUV). O regulaci a usměrňování průtoku v systému se starají čtyři ventily. Dva regulační (V1, V2), jeden škrtkový (ŠV) a jeden odpouštěcí ventil (PV), pro vypouštění teplé užitkové vody z bojleru. O nucený oběh vody v části radiátoru se stará čerpadlo (Č1). Pro měření teploty teplé užitkové vody v části TUV je bojler vybaven odporovým snímačem

teploty Pt100 (T1). Pomocí měřicí karty DAQPad-6015 (MĚŘÍCÍ KARTA) a průmyslového počítače (PC) je snímána teplota z T1 a řízena činnost kotle, čerpadla, odpouštěcího a regulačních ventilů.

Elektrický kotel

Jako zdroj tepelné energie je použit nástěnný přímotopný elektrokotel Dakon Daline PTE-S 4M (obr 2.3), vyrobený firmou DAKON s.r.o. Tento typ se běžně používá pro vytápění menších rodinných domů, chat, bytů, provozoven a obdobných objektů. Udávaný topný výkon je 4kW, maximální teplota ohřívané vody je 95°C. Vnitřní součásti kotle jsou topné těleso, elektroskříň, čerpadlo, filtr, snímač tlaku vody, expanzní nádoba na 7l a pojistný ventil nastavený na 2,5bar. Na čele kotle se pak nachází ovládací panel s posuvnou krytkou.



Obr. 2.3: Elektrický kotel Dakon Daline PTE-S 4M

Bojler

K přenosu tepelné energie z média do teplé užitkové vody je použit upravený kombinovaný akumulční tlakový ohřívač vody TATRAMAT OVK 81 (obr. 2.4) s trubkovým výměníkem. Jmenovitý objem je 75l. Bojleru byly odebrány součásti přímého ohřevu TUV elektrickým proudem, proto veškerá výměna tepelné energie probíhá pouze nepřímo pomocí trubkového výměníku, ve kterém proudí médium (voda) ohřívané v kotli. Bojler byl doplněn o odporový snímač teploty Pt100, jehož naměřená data jsou zaznamenávána přes převodník pomocí měřicí karty.



Obr. 2.4: TATRAMAT OVK 81

Regulační ventil

O velikost přítoku vody do bojleru se stará dvoucestný, tlakově vyvážený přímý regulační ventil s omezovačem průtoku RV 122 P vyrobený firmou LDM s.r.o. Díky omezovači průtoku je možné pro každé měření nastavit jiný jmenovitý průtok vody ventilem a tím pozměnit charakteristiky regulované soustavy, takže nedochází k opakovanému řešení stále stejné úlohy.

Pohyb ventilu zajišťuje elektrický pohon LDM ANT 11.10 se samoadaptivní funkcí. Tato funkce vymezuje rozsah zdvihu pohonu dle krajních poloh zdvihu ventilu. Aby bylo možné otevření regulačního ventilu nastavovat spojitě, je elektropohon pro spolupráci s nadřazeným regulačním systémem vybaven třibodovým řízením. Ovládací napětí elektropohonu je 0 až 24V.



Obr. 2.5: Regulační ventil RV 122 P s elektrickým pohonem

Škrticí ventil

Škrticí ventil v tomto případě figuruje, jako pojistka proti zbytečnému přetěžování čerpadla v kotli. Pokud by byl kotel zapnut a oba regulační ventily uzavřeny, docházelo by k přetěžování čerpadla a tím ke zkracování jeho životnosti. Automatickým otevřením škrticího ventilu je tedy umožněn stálý koloběh vody v systému. Pro případ, kterým je tato diplomová práce, je třicestný regulační ventil (obr. 2.2 V2) v radiátorové části trvale uzavřen. Škrticí ventil se tedy použije v případě uzavření dvoucestného regulačního ventilu (obr. 2.2 V1) se spuštěným kotlem.

Odpouštěcí ventil

Odpouštěcí ventil je připojen přímo na výtokové trubce z bojleru. Je to dvoucestný, dvupolohový, nepřímý řízený, magnetický ventil s membránovým uzávěrem, typ 21W (obr. 2.6) vyrobený firmou STATSO Automation s.r.o. Pokud není přivedeno ovládací napětí o velikosti 24V, zůstává ventil zavřený. Používá se při překročení maximální stanovené teploty TUV v bojleru nebo pro rychlé opětovné připravení úlohy na další měření.



Obr. 2.6: Odpouštěcí ventil 21W

Snímač teploty

Pro měření teploty TUV je bojler vybaven odporovým snímačem teploty Pt100 od firmy JSP s.r.o. Funkce teploměru je založena na principu změny odporu v závislosti na změně teploty okolí. Při konstantním napájecím napětí se změna teploty, resp. odporu, projeví změnou protékajícího proudu. Tento elektrický proud je pomocí U/I převodníku převáděn na napětí, které je snímáno měřicí kartou. Převodník je nutné před započetím práce kalibrovat, aby bylo možno přesně určit okamžitou teplotu teplé užitkové vody v bojleru.

Měřicí karta

O převod informací mezi soustavou a PC se stará měřicí karta DAQPad-6015 (obr. 2.7), která je připojena k PC pomocí USB rozhraní. Slouží ke snímání stavů soustavy a k jejímu řízení. Karta poskytuje 16 šestnáctibitových analogových vstupů (nebo 8 diferenciálních), 8 digitálních kanálů, dva čítače a dva analogové výstupy.

Na diferenciálním vstupu je zapojen teploměr (T1), na jednom analogovém výstupu je připojeno ovládání regulačního ventilu (V1). Jeho aktivace je prováděna pomocí digitálního výstupu. Ovládání kotle, odpouštěcího ventilu (PV) a třicestného regulačního ventilu (V2) je realizováno také pomocí digitálních výstupů.

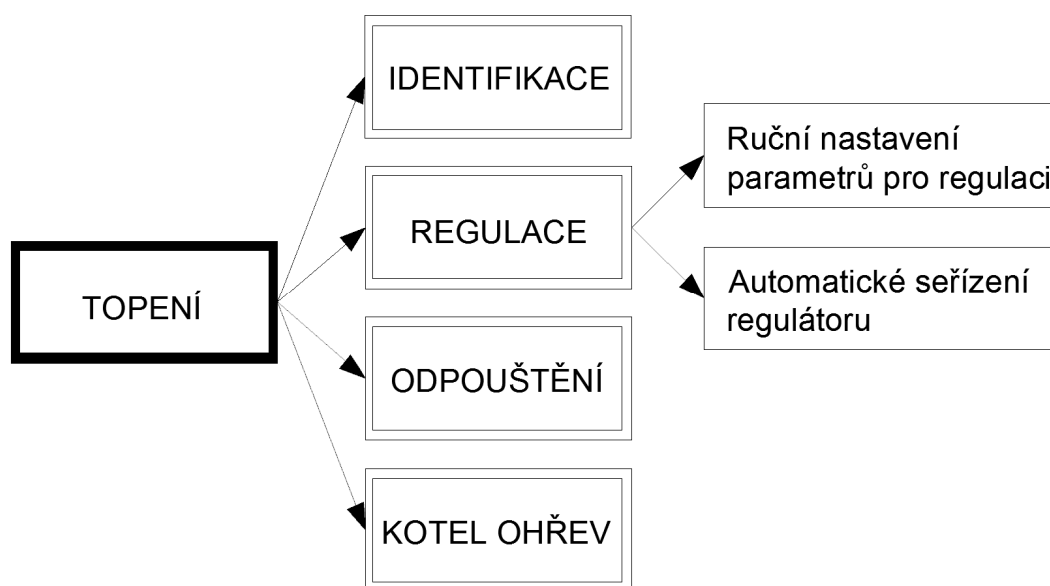


Obr. 2.7: Měřicí karta DAQPad-6015

3 Hierarchie a funkce obslužné aplikace

Obslužný program vytvořil Jan Jonášek jako součást své diplomové práce Laboratorní úloha pro ohřev TUV pro verzi LabVIEW 5.1. Kompletní modernizaci provedl Ing. Michal Moučka, Ph.D. Laboratorní úloha byla doplněna o výkonnější obslužný počítač s dotykovou LCD (Liquid Crystal Display) obrazovkou, byla nainstalována nová měřicí karta a nový U/I převodník. Také obslužný program byl opraven a přizpůsoben pro verzi LabVIEW 8.2. V rámci této diplomové práce pak byla přidána možnost automatického seřízení regulátoru.

Nadřazenou aplikací je program s názvem *Topení*, z jehož hlavní obrazovky se spouští další podprogramy pro měření nebo ovládání soustavy. Posloupnost jednotlivých podprogramů je znázorněna na následujícím schématu (obr. 3.1).



Obr. 3.1: Hierarchie programu *Topení*

Identifikace

Podprogram *Identifikace* se používá při laboratorních měřeních. Studenti si zde naměří data pro následnou individuální identifikaci.

Regulace

V tomto programu dochází k regulaci soustavy. Uživatel může volit mezi ručním zadáním stavitelných parametrů regulátoru nebo automatickým nastavení těchto parametrů. Při zvolení automatického způsobu seřízení regulátoru proběhne nejprve příprava pro měření soustavy (pokud je toto potřeba, například kvůli vysoké teplotě v soustavě). Následně je soustava identifikována, jsou vypočteny regulační parametry a dojde k nastavení regulátoru pro aktuální podmínky.

Odpouštění

Používá se k manuálnímu snížení teploty v soustavě před dalším měřením. Po této operaci je třeba počkat minimálně 15 minut, dokud nedojde ke stabilizaci teplot v soustavě.

Kotel ohřev

Tato funkce se používá před prvním měřením nebo kdykoliv je teplota média na vstupu nedostatečná. Slouží tedy k temperování soustavy.

4 Identifikace soustavy

Pojmem identifikace označujeme proces, při kterém hledáme matematický model daného systému pro daný účel. Jestliže identifikace vychází z procesů matematicko-fyzikální analýzy, označujeme takový postup za *analytickou identifikaci*. Pokud identifikace vychází z měření na systému, experimentu, nazýváme takový postup jako *experimentální identifikaci*.

Experimentální identifikace může probíhat tak, že se v průběhu identifikačního experimentu změřená data nejdříve zaznamenají a uloží na vhodné médium a teprve následně jsou vyhodnocena. Tento způsob je označován jako *offline identifikace*. Jestliže je realizováno přímé spojení počítače s identifikovaným systémem a vyhodnocování změřených dat probíhá vždy uvnitř periody vzorkování, pak hovoříme o *online identifikaci* [7].

Výsledkem experimentální identifikace může být:

- a) *Funkční závislost* mezi zvoleným vstupním a výstupním signálem nebo průběh dynamické charakteristiky. Tento postup je označován jako *neparametrická identifikace*.
- b) *Parametry (koeficienty)* matematického modelu zvolené struktury, jeli možno tuto strukturu odhadnout. Hovoříme pak o *parametrické identifikaci* [7].

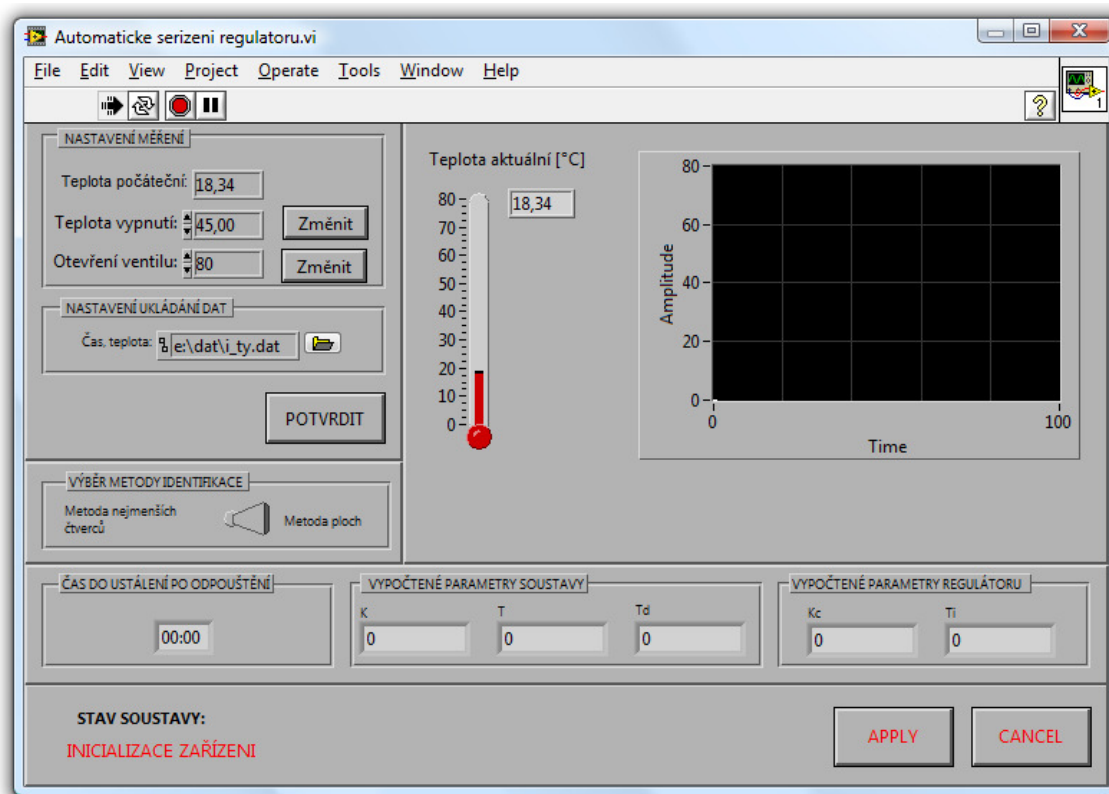
Matematický model je matematické vyjádření podstatných vlastností existujícího nebo konstruovaného systému, který popisuje znalosti o systému v použitelné formě. Matematický model proto vždy představuje jisté zjednodušení a abstrakci studované reality, kterou tímto modelem vyjadřujeme.

Matematické modely dělíme na dva typy:

- a) *Parametrický model* má danou strukturu. Touto strukturou rozumíme řád a zvolený typ diferenciální či diferenční rovnice nebo soustavu těchto rovnic, obrazový nebo diskrétní přenos se zvolenými stupni polynomů v čitateli a jmenovateli nebo přenosovými maticemi zvoleného rozměru atd.
- b) *Neparametrický model* představuje zpravidla funkční závislost mezi zvoleným vstupním a odpovídajícím výstupním signálem. Tato závislost se vyjadřuje buď graficky pomocí záznamu z měření odezev systému, nebo pomocí tabulky hodnot, popisující číselně danou závislost [7].

4.1 Podprogram Automatické seřízení regulátoru

Pro účely automatického seřízení PID regulátoru byl vytvořen program *Automaticke serizeni regulatoru.vi* (obr. 5.1). Při běhu programu prochází soustava postupně třemi fázemi. Přípravná fáze obsahuje inicializaci měřicí karty, automatickou kontrolu teploty v soustavě a zadávání parametrů měření. Ve fázi měření pak dochází k nastavení polohy regulačního ventilu V1 (obr. 2.2 V1), následně ke sběru dat ze soustavy a dále k opětovnému uzavření regulačního ventilu. Fáze výpočtu pak slouží pro analýzu naměřených dat, výpočet parametrů soustavy a výpočet parametrů PID regulátoru. Výsledek je pak předán nadřazené aplikaci *Regulace.vi*. Zdrojový kód je vzhledem k své obsáhlosti přiložen pouze na CD.



Obr. 4.1: Čelní panel programu *Automaticke seřízení regulatoru.vi*

4.1.1 Příprava měření

Před vlastním měřením je inicializována měřicí karta a nastaveny komunikační kanály pro ovládání soustavy a snímání měřících prvků. Dále je kontrolována aktuální teplota v bojleru, aby při měření nedocházelo k limitaci technologickými možnostmi soustavy. Pokud je teplota v bojleru vyšší než 25°C dojde k automatickému odpuštění vody. Doba odpouštění opět závisí na aktuální teplotě v soustavě. Při teplotách pod 40°C dojde k odpuštění vody o délce trvání 20s. U teplot nad 40°C je tato doba nastavena na 40s. Po každém odpouštění musí dojít k ustálení teplot v soustavě. Doba pro promísení vody v bojleru a ustálení teplot je minimálně 15 minut. K informování uživatele o zbývajícím čase slouží časový údaj (odpočet) na čelním panelu programu. Po uplynutí této doby, pokud tedy bylo odpouštění potřeba, je již uživatel vyzván k zadání parametrů pro následné měření.

NASTAVENÍ MĚŘENÍ:

Teplota počáteční – slouží jako informační údaj o začátku měření a je též výchozí hodnotou pro *Teplotu vypnutí*. Po spuštění měření se jedná o konstantní údaj.

Teplota vypnutí – *Teplotu vypnutí* nastavuje uživatel. Jedná se o teplotu, po jejímž dosažení se měření automaticky ukončí. Je nutné, aby se tato hodnota dostatečně lišila od počáteční teploty užitkové vody v bojleru. Při malém tepelném rozdílu by počet naměřených hodnot byl nedostatečný pro identifikaci systému a následný výpočet parametrů PID regulátoru. Tuto teplotu je třeba zadat minimálně o 10°C vyšší než je aktuální *Teplota počáteční*.

Otevření ventilu – položka *Otevření ventilu* je také nastavována uživatelem, slouží k nastavení velikosti otevření regulačního ventilu V1 (obr 2.2 V1). Výchozí hodnota je nastavena na 80%. Hodnoty pro otevření ventilu se pohybují v rozmezí 20% až 100%. Během měření již nelze měnit.

Nastavení ukládání dat – zde je možné zvolit soubor, do kterého se mají uložit naměřená data, která lze následně použít pro ruční identifikaci. Data jsou uložena formou textového souboru.

Tlačítkem *POTVRDIT* dojde k akceptaci zadaných hodnot a k přechodu do další fáze. *CANCEL* slouží k ukončení veškeré činnosti a k návratu do nadřazené aplikace.

4.1.2 Měření

Fáze měření je pro uživatele značně pasivní, neboť vše probíhá automaticky. Data jsou zaznamenávána zároveň do textového souboru a do dvourozměrného pole, které je následně využito pro výpočty parametrů soustavy a regulátoru. Uživatel může pouze sledovat rostoucí *Teplotu aktuální [°C]*, případně celé měření ukončit tlačítkem *CANCEL*. V případě předčasného ukončení měření nedochází k výpočtu ani k předávání parametrů. Během měření již také nelze měnit *NASTAVENÍ MĚŘENÍ*. Po skončení měření je automaticky uzavřen regulační ventil V1 (obr. 2.2), aby nedocházelo k dalšímu, v tuto chvíli již nechtěnému, ohřívání TUV v bojleru.

4.1.3 Výpočet parametrů

Pro výpočet parametrů soustavy byly použity dvě metody identifikace. Uživatel může pomocí jednoduchého přepínače zvolit, zda se pro následnou regulaci použijí výsledky získané *Metodou ploch* anebo *Metodou nejmenších čtverců*. K zobrazení výsledků výpočtu slouží pole *VYPOČTENÉ PARAMETRY SOUSTAVY*, kde jednotlivé členy jsou:

- K je zesílení procesu [V],
- T je časová konstanta [s],
- T_d je dopravní zpoždění přenosu [s].

V závislosti na vybrané metodě identifikace jsou pak zobrazeny výsledky výpočtu pro regulátor v poli *VYPOČTENÉ PARAMETRY REGULÁTORU*, kde jednotlivé členy jsou:

- K_C je proporcionální zesílení regulátoru [-],
- T_I je integrační časová konstanta regulátoru [s].

Parametry získané během této fáze lze předat programu pro regulaci prostřednictvím tlačítka *APPLY*. Tlačítkem *CANCEL* dojde k ukončení běhu podprogramu *Automatické serizeni regulatoru.vi* a vypočtené parametry nebudou předány.

4.2 Vyhodnocení

Před aplikací metod pro vyhodnocení získaného signálu byl použit lineární diskretní filtr 1. řádu [2] (4.1), který má za úkol zmírnit zašumění signálu. Použití tohoto filtračního algoritmu není nezbytně nutné, ale bylo na této soustavě experimentálně zjištěno, že jeho použití má kladný vliv na výsledky použitých metod, resp. vypočtená přechodová charakteristika více odpovídá naměřenému jevu.

$$h_f(kT) = (1 - a) \cdot h_f[(k - 1)T] + a \cdot h(kT), \quad (4.1)$$

kde $h_f(kT)$ je filtrovaná vstupní veličina v časovém okamžiku kT [V],
 $h(kT)$ je výstupní veličina v časovém okamžiku kT [V],
 a je koeficient filtrace [-].

Koeficient filtrace se může pohybovat v rozmezí hodnot $0 < a \leq 1$, jeho nastavením na $a = 1$ dochází k vypnutí filtru. Nejlepších výsledků pro tuto soustavu je dosahováno při nastavení $a = 0,7$, které je také implicitně použito.

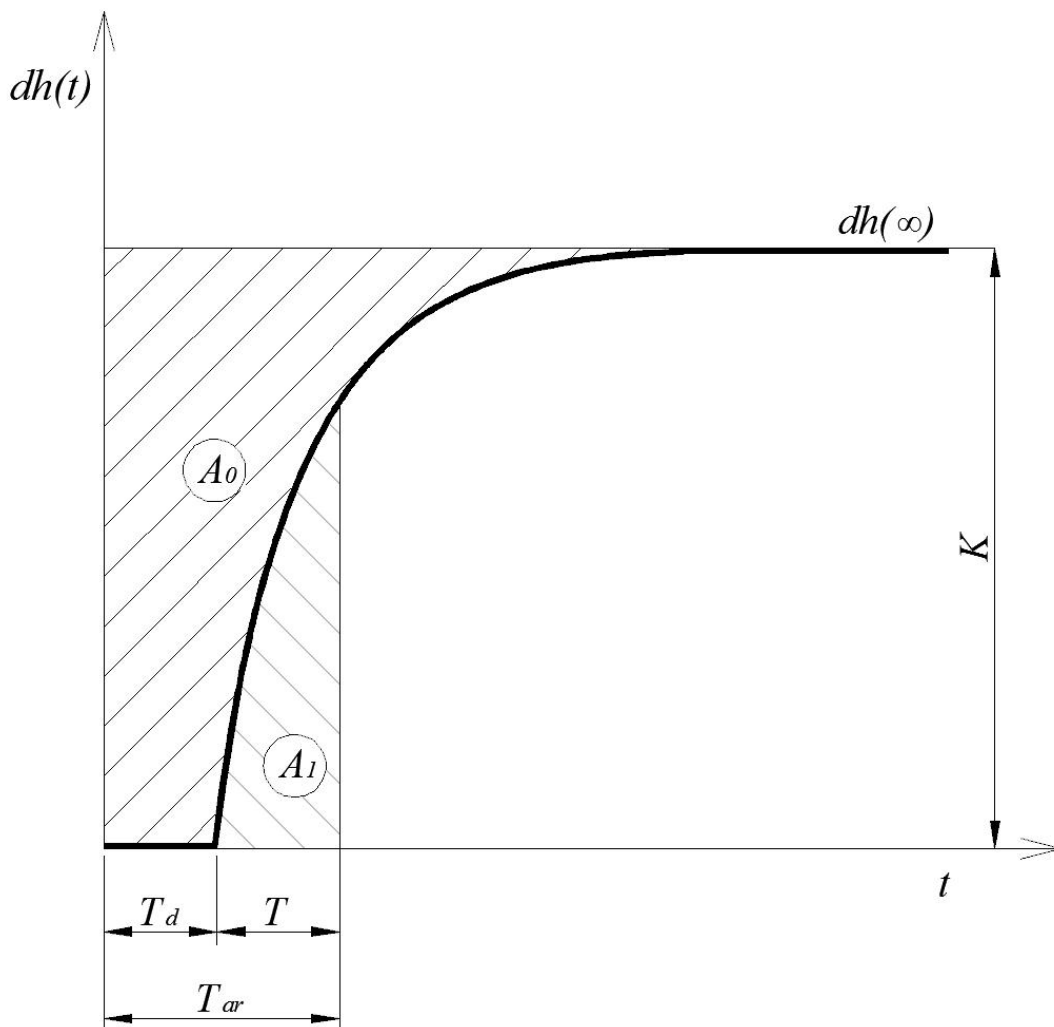
Nyní máme tedy všechny potřebné informace pro použití metod k určení parametrů přenosu. Program *Automaticke serizeni regulatoru.vi* používá pro tento účel dvě metody - *Metodu ploch* a *Metodu nejmenších čtverců*.

4.2.1 Metoda ploch

Jádrem této metody jsou plochy (obr. 4.2.1), které byly získány z 1. derivace přechodové charakteristiky [1].

$$dh(i) = \frac{h(i) - h(i - 1)}{\Delta t}, \quad (4.2)$$

kde $dh(i)$ je 1. derivace přechodové charakteristiky v daném časovém okamžiku [V],
 $h(i)$ je bod na přechodové charakteristice v daném čase [V],
 Δt je perioda vzorkování [s].



Obr. 4.2.1: Derivace přechodové charakteristiky a zobrazení výpočtových ploch

Nejprve bylo získáno zesílení procesu K (4.3) jako maximum 1. derivace přechodové charakteristiky [1]

$$K = dh(\infty), \quad (4.3)$$

kde K je zesílení procesu [V],
 $dh(\infty)$ je maximum 1. derivace přechodové charakteristiky [V].

Odečtením zesílení procesu K byla zároveň získána horní mez pro výpočet plochy nad křivkou A_0 (obr. 4.2.1) [1]

$$A_0 = \int_0^{\infty} (dh(\infty) - dh(t)) dt, \quad (4.4)$$

kde A_0 je výpočtová plocha nad křivkou [Vs],
 $dh_{\max}$ je maximální hodnota směrnice [V],
 $dh(t)$ je velikost směrnice v daném okamžiku [V],
 t je čas, ve kterém se nachází $dh_{\max}$ [s].

S využitím zesílení procesu K (4.3) a výpočtové plochy A_0 (4.4) byla vypočítána průměrná doba zdržení T_{ar} ze vztahu [1]

$$T_{ar} = \frac{A_0}{K}. \quad (4.5)$$

Časová konstanta T_{ar} pak byla použita jako mez pro výpočet plochy A_1 (obr. 4.2.1) [1]

$$A_1 = \int_0^{T_{ar}} dh(t) dt, \quad (4.6)$$

kde A_1 je výpočtová plocha pod křivkou [Vs],
 T_{ar} je průměrná doba zdržení [s].

Ze známé plochy pod křivkou A_1 (4.6) a velikosti zesílení procesu K , byla dále vypočtena časová konstanta soustavy T [1]

$$T = \frac{e \cdot A_1}{K}, \quad (4.7)$$

kde T je časová konstanta soustavy [s],

e je Eulerovo číslo [-],

K je zesílení procesu [V].

Dopravní zpoždění soustavy T_d pak bylo dopočítáno jako rozdíl průměrné doby zdržení T_{ar} a časové konstanty soustavy T [1]

$$T_d = T_{ar} - T, \quad (4.8)$$

4.2.2 Metoda nejmenších čtverců

Metoda nejmenších čtverců [3] slouží k nalezení takového řešení, aby součet druhých mocnin chyb nalezeného řešení byl minimální. Tuto metodu lze popsat vztahem

$$e^2(k) = \sum_{i=1}^N (h_i - h_{Mi})^2, \quad (4.9)$$

kde $e^2(k)$ je kvadrát odchylky [V²],

N je počet změřených hodnot [-],

h_i je změřená hodnota přechodové charakteristiky [V],

h_{Mi} je vypočítaná hodnota přechodové charakteristiky [V].

Programové vyjádření metody nejmenších čtverců spočívá v postupném dosazování jednotlivých parametrů do vztahu (4.9) v rozsahu možných řešení a následnému porovnávání s minimální odchylkou. Pokud v tomto procesu nebylo řešení nalezeno, dochází k nastavení větší tolerance kvadrátu odchylky. Jednotlivé parametry byly dosazovány do vztahu (4.10)

$$h_M(t) = K \cdot \left(t - T + T \cdot e^{\left(\frac{-t}{T} \right)} \right), \quad (4.10)$$

kde h_M je vypočítaná hodnota přechodové charakteristiky v čase t [V],
 K je zesílení procesu [V],
 T je časová konstanta soustavy [s],
 e je Eulerovo číslo [-],
 t je čas [s].

Vztah (4.10) byl odvozen z rovnice (4.11) přenosu soustavy bez složky dopravního zpoždění T_d

$$H(s) = \frac{1}{s^2} \cdot \frac{K}{T \cdot s + 1}, \quad (4.11)$$

kde s je komplexní proměnná Laplaceova obrazu [-],
 $H(s)$ je Laplaceův obraz [-].

Dále byl proveden rozklad na parciální zlomky (4.12) [9]

$$H(s) = \frac{A_1}{s} + \frac{A_2}{s^2} + \frac{B}{T \cdot s + 1}, \quad (4.12)$$

Členy A_1 a A_2 měly stejné kořeny jmenovatele. Řešení konstanty A_1 (4.13) pro $s = 0$ bylo [9]

$$A_1 = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{d}{ds} (s^2 \cdot H(s)) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{d}{ds} \left(s^2 \cdot \frac{1}{s^2} \cdot \frac{K}{T \cdot s + 1} \right) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{d}{ds} \left(\frac{K}{T \cdot s + 1} \right)$$

$$A_1 = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{-K \cdot T}{(T \cdot s + 1)^2} = -K \cdot T. \quad (4.13)$$

Řešení konstanty A_2 (4.14) pro $s = 0$ bylo

$$A_2 = \lim_{s \rightarrow 0} (s^2 \cdot H(s)) = \lim_{s \rightarrow 0} \left(s^2 \cdot \frac{1}{s^2} \cdot \frac{K}{T \cdot s + 1} \right) = \lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{K}{T \cdot s + 1} \right) = K. \quad (4.14)$$

Konstanta B (4.15) pak byla vypočtena jako

$$B = \lim_{s \rightarrow -\frac{1}{T}} ((T \cdot s + 1) \cdot H(s)) = \lim_{s \rightarrow -\frac{1}{T}} \left(\frac{K}{s^2} \right) = K \cdot T^2. \quad (4.15)$$

Výsledky rovnic (4.13), (4.14) a (4.15) byly dosazeny do vztahu (4.12)

$$H(s) = \frac{-K \cdot T}{s} + \frac{K}{s^2} + \frac{K \cdot T^2}{T \cdot s + 1} = \frac{-K \cdot T}{s} + \frac{K}{s^2} + \frac{K \cdot T}{s + \frac{1}{T}}. \quad (4.16)$$

Po této úpravě již byla provedena zpětná Laplaceova transformace za použití slovníku Laplaceovy transformace, viz (tab. 4.1) [6],

$$h_M(t) = -K \cdot T + K \cdot t + K \cdot T \cdot e^{-\frac{t}{T}}. \quad (4.17)$$

Vytknutím konstanty K byl získán výsledný vztah (4.10).

Tab. 4.1: Použité Laplaceovy obrazy

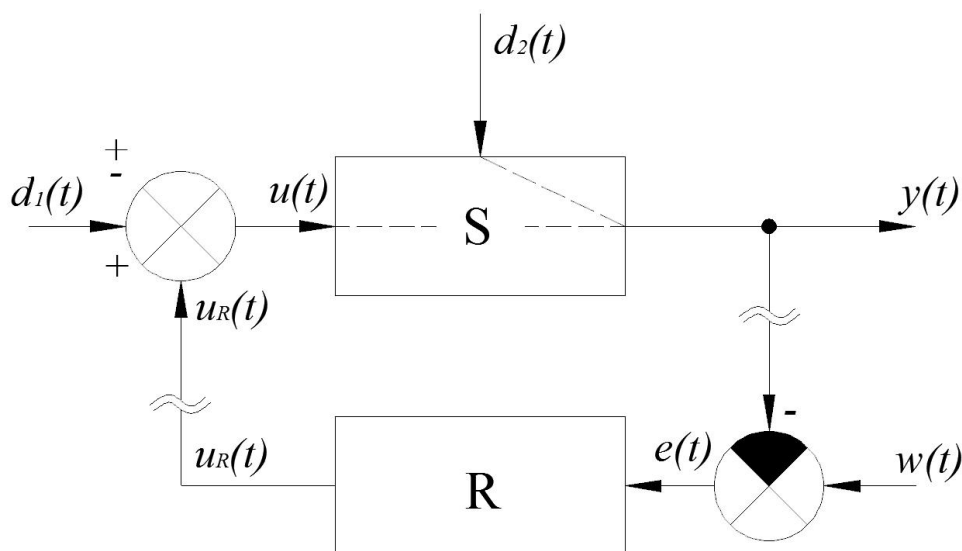
Obraz	Předmět
$\frac{1}{s}$	1
$\frac{1}{s^2}$	t
$\frac{1}{s+a}$	$e^{-a \cdot t}$

5 Regulace

Regulátorem [2] je nazýváno zařízení v regulačním obvodu, kterým se uskutečňuje proces automatické regulace. Do regulátoru (řídícího systému) zahrnujeme obvykle kromě regulované soustavy všechny členy regulačního obvodu (obr. 5.1). Podstata činnosti regulátoru spočívá ve vyhodnocení regulační odchylky

$$e(t) = w(t) - y(t), \quad (5.1)$$

jako vstupního signálu, ve zpracování této odchylky podle zákona řízení, který je vlastní použitému regulátoru a ve vytvoření výstupního signálu (akční veličiny) $u_R(t)$ s cílem tak, aby odchylka $e(t)$ byla eliminována zcela nebo aby byla co nejmenší [2].



Obr. 5.1: Schéma regulačního obvodu

Kde	S	je regulovaná soustava (řízený systém),
	R	je regulátor (řídící systém),
	$y(t)$	je regulovaná veličina [V],
	$u(t)$	je akční veličina [V],
	$e(t)$	je regulační odchylka [V],
	$d_1(t), d_2(t)$	jsou poruchové veličiny [V],
	$w(t)$	je řídicí veličina [V].

Pro regulaci laboratorní úlohy byl použit PI regulátor, který je součástí aplikace *Regulace.vi*. PID regulátor nebylo možné v tomto případě použít. Signál je zašuměný a tak by derivační složka šum jen zesilovala. PI regulátor odstraňuje trvalou regulační odchylku, která by mohla vzniknout při použití P nebo PD regulátoru.

5.1 Metoda výpočtu regulačních parametrů

K výpočtu regulačních parametrů byla použita metoda Kappa-Tau. Nejprve bylo vypočteno normalizované dopravní zpoždění τ [1]

$$\tau = \frac{T_d}{T_d + T}, \quad (5.2)$$

kde τ je normalizované dopravní zpoždění [-],
 T_d je dopravní zpoždění soustavy [s],
 T je časová konstanta soustavy [s].

Dalším krokem pak byl výpočet proporcionálního zesílení regulátoru K_R [1] a integrační časové konstanty T_I [1]

$$K_R = \frac{0,41}{K \cdot (T_d + T)} \cdot e^{-0,23 \cdot \tau + 0,019 \cdot \tau^2}, \quad (5.3)$$

$$T_I = 5,7 \cdot (T_d + T) \cdot e^{1,7 \cdot \tau - 0,69 \cdot \tau^2}, \quad (5.4)$$

kde K_R je proporcionální zesílení regulátoru [-],
 T_I je integrační časová konstanta [s],
 K je zesílení procesu [V].

6 Automatická identifikace

6.1 Určení typu přenosu

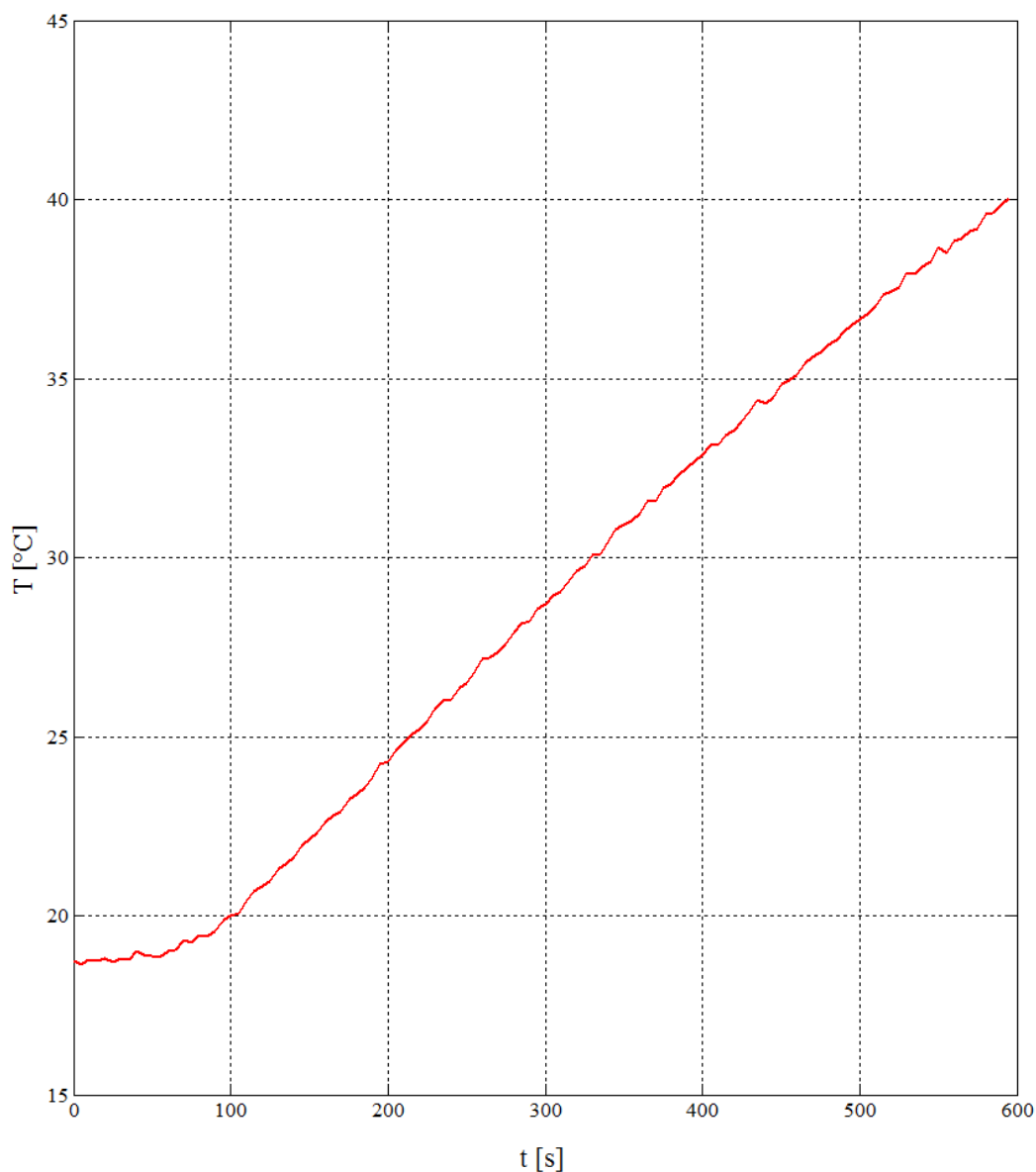
Nejprve bylo nutné zjistit odezvu systému na známý skok, jehož parametry byly:

Počáteční teplota $T_0 = 18,74^{\circ}\text{C}$

Teplota vypnutí $T_V = 40^{\circ}\text{C}$

Otevření ventilu $u_V = 80\%$

Výsledkem tohoto měření byla data, která reprezentují odezvu systému (obr. 6.1).



Obr. 6.1: Odezva systému na skok z teploty $T_0 = 18,74^{\circ}\text{C}$ na $T_V = 40^{\circ}\text{C}$

Z naměřených dat byl vypočten průběh přechodové charakteristiky (obr. 6.2)

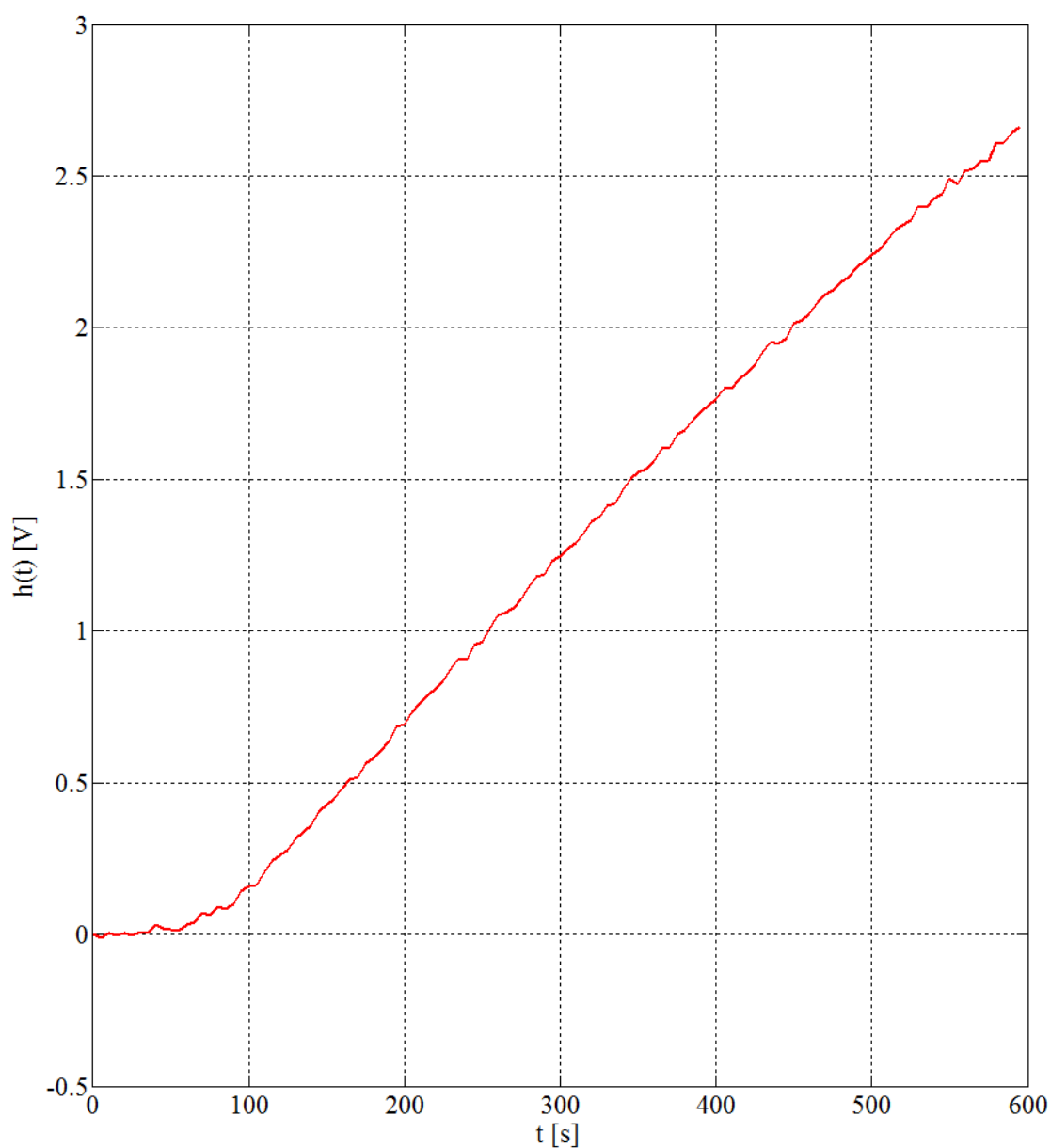
$$h(t) = \frac{T(t) - T_0}{U_v}, \quad (6.1)$$

kde $h(t)$ je hodnota přechodové funkce v daném čase [V],

$T(t)$ je naměřená teplota v daném čase [°C],

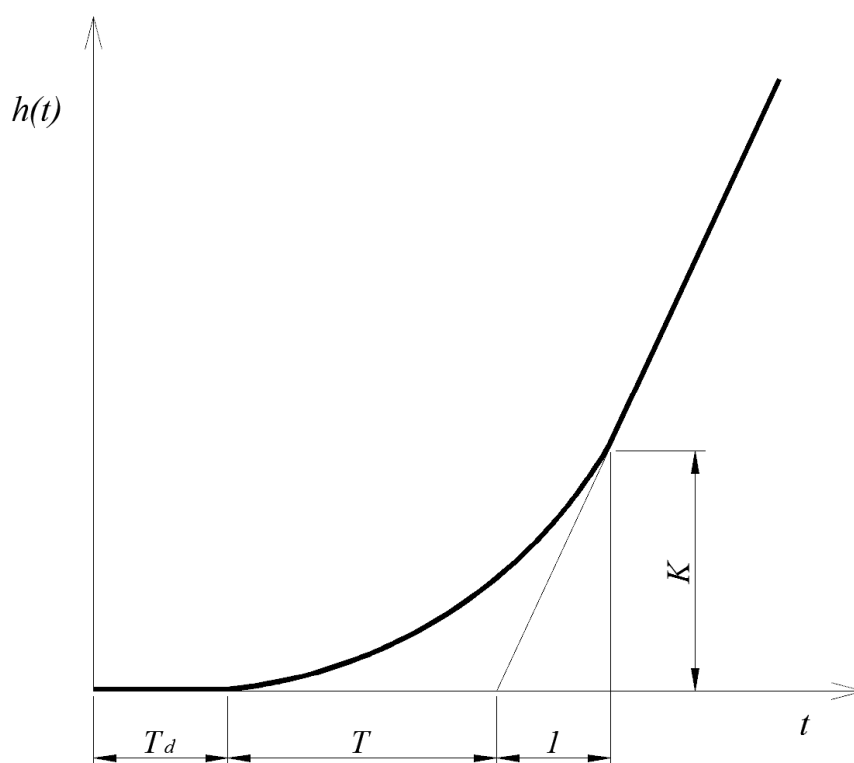
T_0 je počáteční teplota měření [°C],

U_v je otevření ventilu [V].



Obr. 6.2: Přechodová charakteristika

Dalším krokem bylo určení typu analyzované soustavy. Z grafu (obr. 6.2) je patrné, že po otevření regulačního ventilu soustava vykazuje nejprve dopravní zpoždění. Po této době následuje růst teploty, který se nakonec ustálí na konstantní hodnotě. Tato hodnota je dána kombinací vstupních parametrů měření a technologickými možnostmi laboratorní úlohy. Z těchto získaných poznatků bylo usouzeno, že se jedná o soustavu astatickou (integrační) prvního řádu s dopravním zpožděním. Řád astatismu je roven jedné (obr. 6.3) [3].



Obr. 6.3: Astatická (integrační) soustava prvního řádu s dopravním zpožděním

Tento typ soustavy lze obecně vyjádřit pomocí přenosu (tří-parametrového integračního modelu) [2]

$$G(s) = \frac{K}{s \cdot (T \cdot s + 1)} \cdot e^{-s \cdot T_d}, \quad (6.2)$$

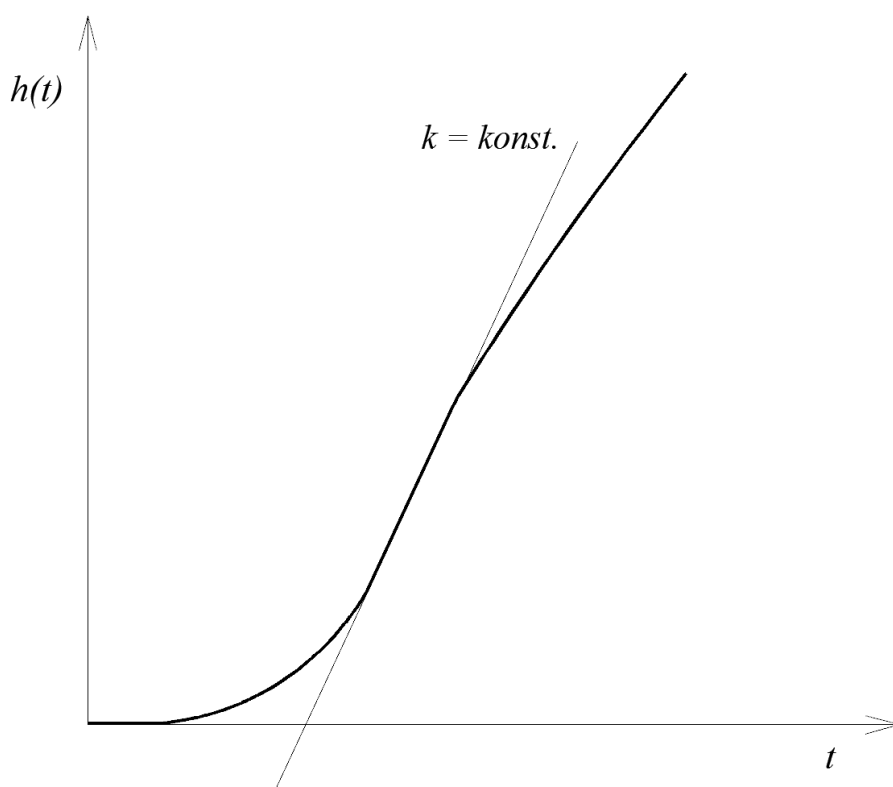
kde $G(s)$ je přenos systému [-],

K je zesílení procesu [V],

T je časová konstanta [s],

T_d je dopravní zpoždění [s].

Velmi důležité bylo také správně určit meze pro výpočet obou metod. Během ohřevu TUV v bojleru dojde k dosažení maxima růstu teploty, avšak tento růst nesetrvává na svém maximu až do konce měření. Dochází k jeho poklesu. Hlavní příčinou je zdroj tepelné energie, tedy elektrický kotel Dakon Daline PTE-S 4M, který nemůže zajistit přísun vody o stejné teplotě jako na počátku měření. Tento pokles růstu teploty se následně promítne do výsledků měření a tedy i do přechodové charakteristiky (obr. 6.4). Se stoupajícím rozdílem počáteční a koncové teploty v bojleru se tento jev stává více patrným. [1]



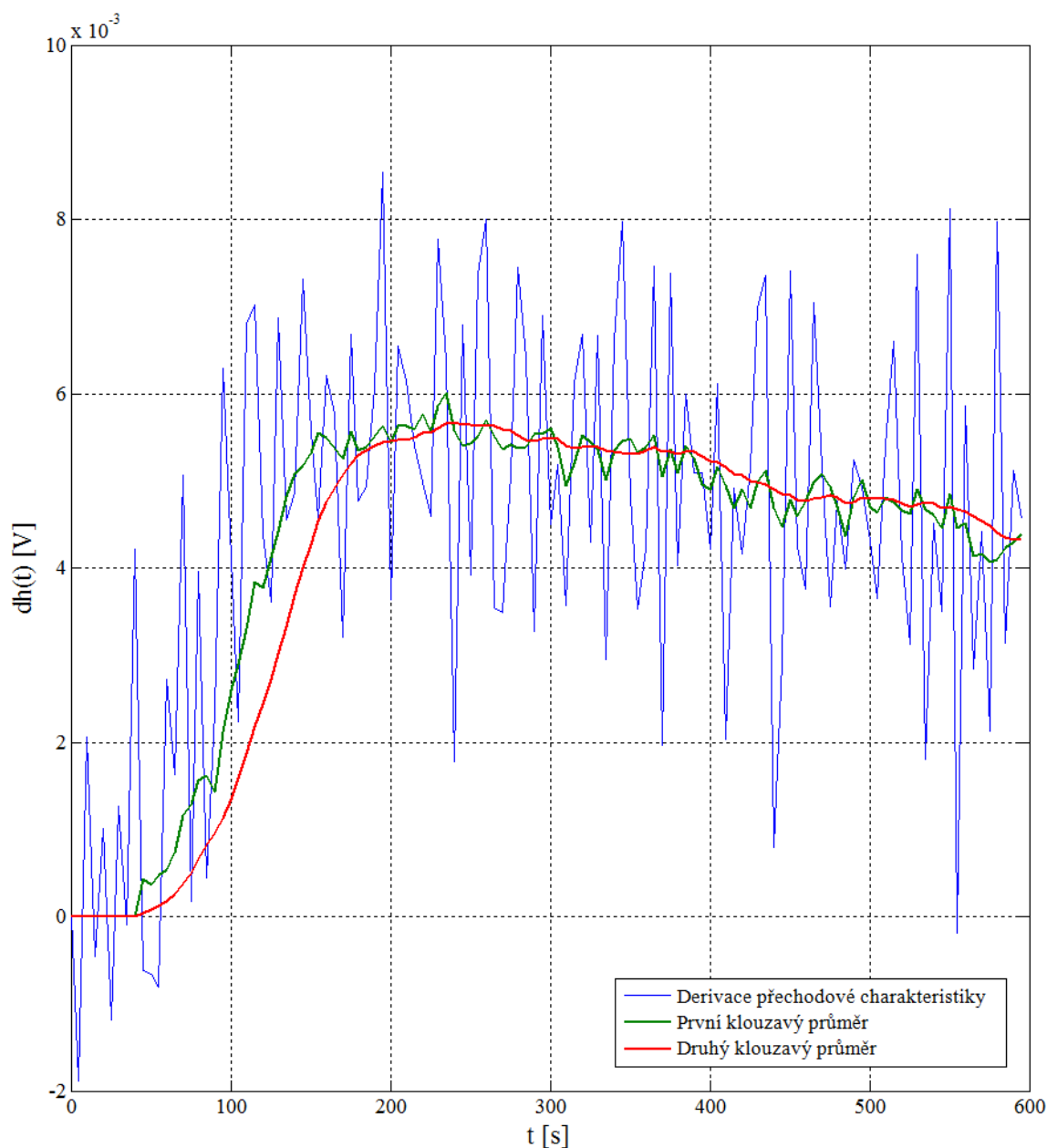
Obr. 6.4: Přechodová charakteristika s poklesem teplotního růstu

Mez pro určení výpočtové oblasti byla získána z 1. derivace přechodové charakteristiky, kde se tento jev zobrazil jako maximální hodnota směrnice (obr. 6.5). V programovém zápisu tohoto postupu bylo třeba brát v potaz zašumění signálu, které se po derivaci velmi zvýrazní (obr. 6.5) a znemožní přímý odečet maximální hodnoty směrnice. Proto je před touto operací proveden pomocný výpočet jednoduchého klouzavého průměru $p_{10}(t)$ s rozsahem deseti hodnot, aby došlo k vyhlazení zašuměné křivky. Tato akce je provedena hned dvakrát po sobě, neboť po prvním provedení je odečet stále obtížný a nespolehlivý.

Výpočet klouzavého průměru $p_{10}(t)$ probíhá podle vztahu

$$p_{10}(t) = \frac{\sum_{i=10}^0 dh(t-i)}{10} . \quad (6.3)$$

Na obrázku (obr. 6.5) je vidět výsledek této operace. Nyní již lze v programu pomocí jednoduché podmínky stanovit maximální velikost směrnice i časový bod, který vymezení hranice pro průběh výpočtu.



Obr. 6.5: Derivace přechodové charakteristiky a zobrazení klouzavých průměrů

6.2 Metoda ploch

Vztahy (4.3), (4.4) a (4.6) popsané v kapitole 4.2.1 Metoda ploch byly upraveny pro použití v programových funkcích do následujících tvarů:

Zesílení procesu K

$$K = dh_{\max}, \quad (6.4)$$

kde $dh_{\max}$ je maximální hodnota 1. derivace přechodové charakteristiky [V].

Výpočtová plocha nad křivkou A_0

$$A_0 = \sum_{i=0}^t [(K - dh(i)) \cdot \Delta t], \quad (6.5)$$

kde $dh(i)$ je velikost směrnice v daném okamžiku [V],

t je čas, ve kterém se nachází $dh_{\max}$ [s],

Δt je perioda vzorkování [s].

Výpočtová plocha pod křivkou A_1

$$A_1 = \sum_{i=0}^{T_{ar}} (dh(i) \cdot \Delta t), \quad (6.6)$$

kde T_{ar} je průměrná doba zdržení [s].

Pomocí takto nastaveného programu byly získány jednotlivé parametry soustavy

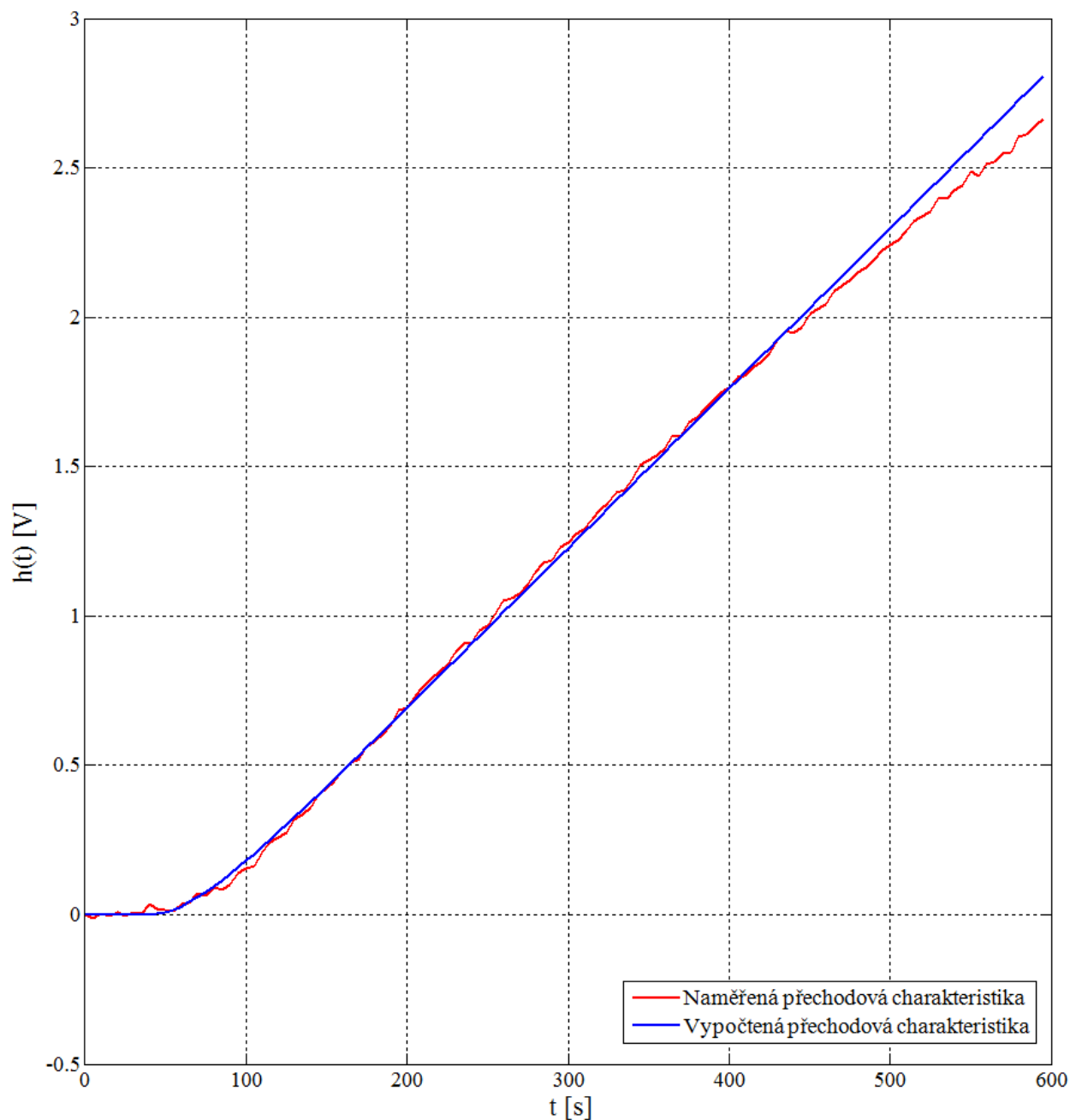
$$K = 0,005351 \text{ V}, \quad T = 31,11 \text{ s}, \quad T_d = 39,54 \text{ s},$$

$$K_R = 0,959, \quad T_I = 840,206 \text{ s}.$$

Dosazením těchto hodnot do (6.2) pak získáme výsledný obrazový přenos

$$G(s) = \frac{0,005351}{s \cdot (31,11 \cdot s + 1)} \cdot e^{-39,54 \cdot s}, \quad (6.7)$$

Kontrola správnosti výsledku byla provedena porovnáním naměřené a výpočtem získané přechodové charakteristiky, viz. (obr. 6.6).



Obr. 6.6: Porovnání naměřené a vypočtené přechodové charakteristiky

6.3 Metoda nejmenších čtverců

Postupem popsaným v kapitole 4.2.2 nedochází k řešení parametru dopravního zpoždění T_d . Pokud by byla identifikace prováděna ručně, zřejmě bychom dokázali z grafu velikost dopravního zpoždění předem odhadnout. V programu však bylo nutné, aby tento proces probíhal zcela automaticky, spolehlivě a pouze z dostupných dat. Vzhledem ke stupni zašumění signálu a nedostatku dat v oblasti dopravního zpoždění, nebylo možné nalézt dlouhodobě spolehlivý indikátor pro odhad dopravního zpoždění T_d . Proto byla k odhadu dopravního zpoždění použita část algoritmu metody ploch. Tento postup se během testování projevil jako stabilní a přesný.

Pomocí programu pracujícího s metodou nejmenších čtverců byly získány jednotlivé parametry soustavy o velikostech

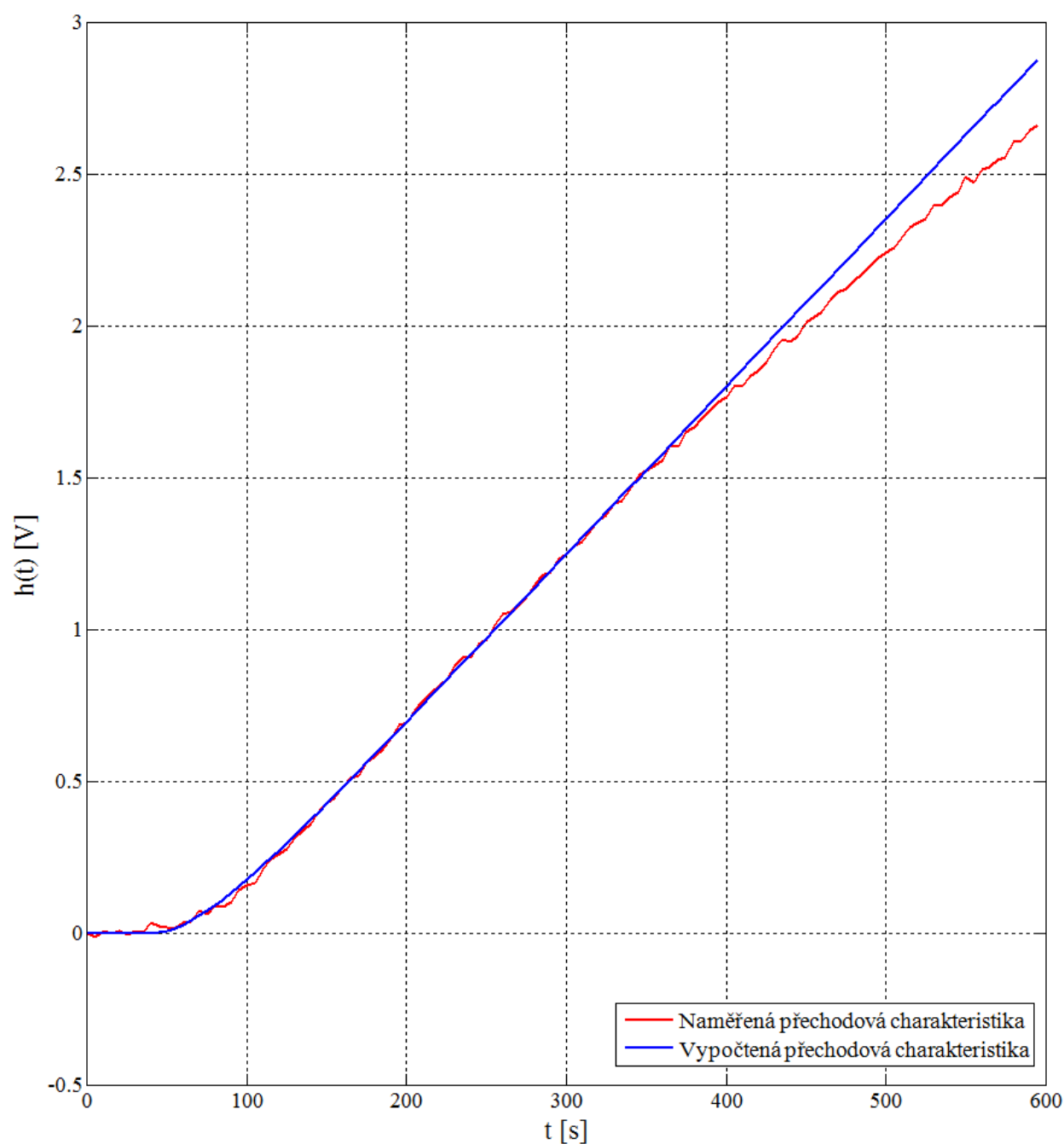
$$\begin{aligned}K &= 0,00552 \text{ V}, & T &= 34 \text{ s}, & T_d &= 40 \text{ s}, \\K_R &= 0,891, & T_I &= 864,233 \text{ s}.\end{aligned}$$

Dosazením těchto hodnot do (6.2) pak získáme výsledný obrazový přenos

$$G(s) = \frac{0,00552}{s \cdot (34 \cdot s + 1)} \cdot e^{-40 \cdot s}. \quad (6.8)$$

Kontrola správnosti výsledku byla opět provedena porovnáním naměřené a výpočtem získané přechodové charakteristiky (obr. 6.7).

Přesnost výpočtu je nastavena pro časovou konstantu T na jednotky sekund a pro zesílení procesu K výpočet probíhá s přesností na deseti-tisíciny. Takto nastavená přesnost je výsledkem kompromisu mezi požadavkem na preciznost výsledku a snahou dosáhnout malé časové náročnosti výpočtu.



Obr. 6.7: Porovnání naměřené a vypočtené přechodové charakteristiky

6.4 Porovnání výsledků

Metoda nejmenších čtverců by nejspíše dosahovala lepších výsledků s vyšší hustotou naměřených dat. Toto by však zároveň mělo negativní dopad na čas potřebný k nalezení řešení. Tato metoda lépe kopíruje výpočtovou oblast i při použití nižší přesnosti výpočtu.

Metoda ploch by při použití vyšší hustoty naměřených dat na rychlosti výpočtu nijak výrazně neztrácela. Zároveň by také nedošlo k jejímu výraznému zpřesnění, protože snímaná data by vykazovala stejný stupeň zašumění, jen o vyšší hustotě.

Obě metody vykázaly s malými odchylkami podobné a zároveň postačující výsledky výpočtu (tab. 6.1). Jejich grafické porovnání je znázorněno na následujícím grafu (obr. 6.8).

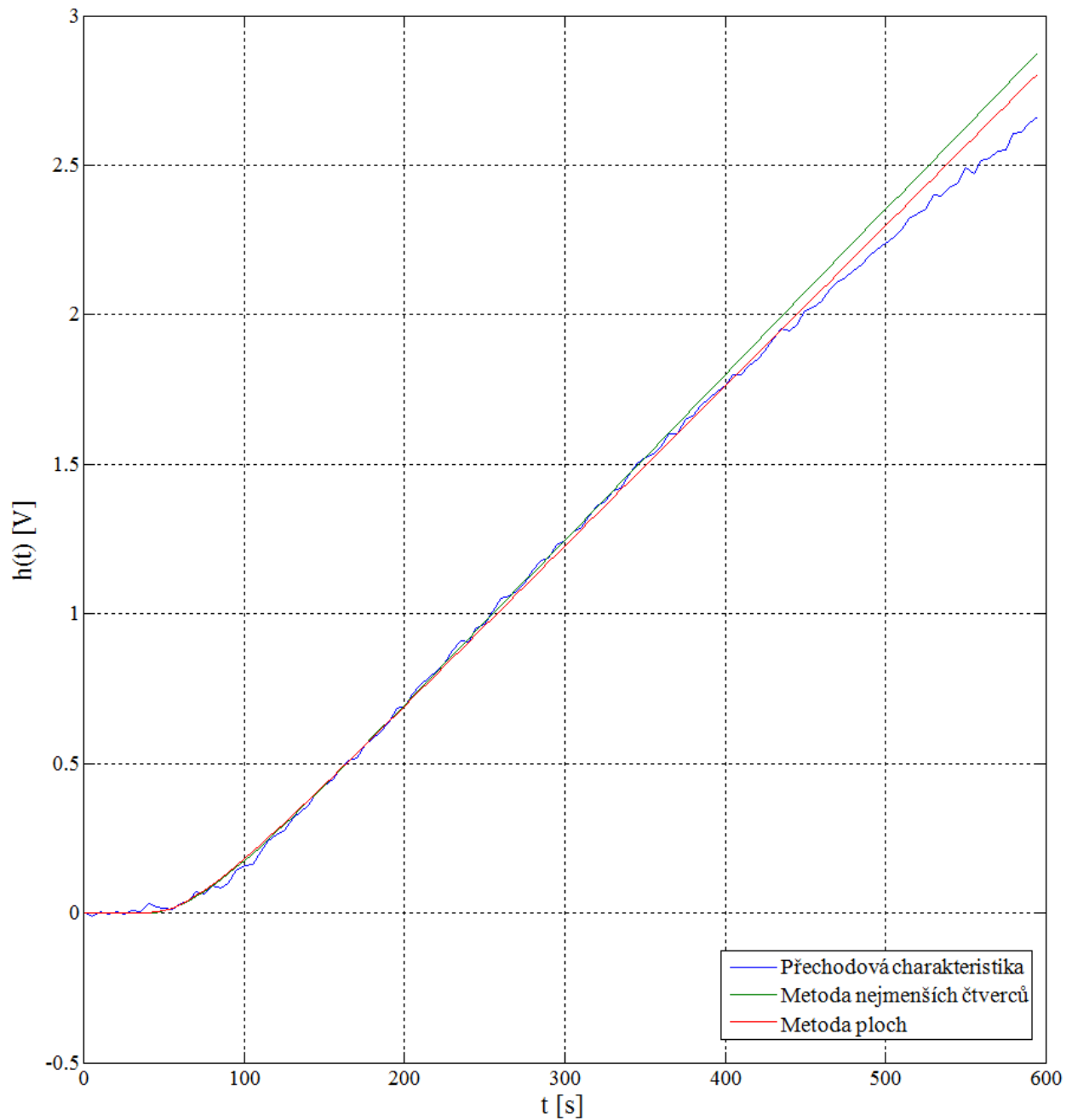
Číselné porovnání

Tab. 6.1: Porovnání výsledků metod

	Metoda ploch	Metoda nejmenších čtverců
K [V]	0,005351	0,00552
T [s]	31,11	34
T_d [s]	39,54	40
K_R [-]	0,959	0,891
T_I [s]	840,206	864,233

Kde K je zesílení procesu [V],
 T je časová konstanta [s],
 T_d je dopravní zpoždění [s],
 K_R je proporcionální zesílení regulátoru [-],
 T_I je integrační časová konstanta [s].

Grafické porovnání



Obr. 6.8: Porovnání výsledků metod a změřené přechodové charakteristik

7 Závěr

Prvním úkolem bylo seznámit se s modelem tepelného hospodářství, který se nachází v Laboratoři automatického řízení Katedry aplikované kybernetiky. Seznámení je popsáno druhou kapitolou této diplomové práce.

Úkolem druhým bylo navržení a následná realizace programového modulu pro automatické seřízení PID regulátoru určeného pro řízení teploty TUV v bojleru. Pro automatickou identifikaci soustavy byly použity dvě metody. Metoda ploch a metoda nejmenších čtverců.

Jejich programové použití bylo zpočátku ne zcela spolehlivé. Hlavním problémem se ukázalo být zašumění naměřeného signálu, které velmi ztížilo nalezení meze pro použití výpočtu. Druhým problémem byl odhad dopravního zpoždění pro metodu nejmenších čtverců. Vzhledem k malé hustotě naměřených dat v okolí výskytu dopravního zpoždění nebyl nalezen způsob, který by byl dostatečně spolehlivý pro automatické řešení. Proto byla k nalezení dopravního zpoždění použita část metody ploch. Metoda nejmenších čtverců také zpočátku vykazovala vysoké nároky na čas pro nalezení řešení. Tento problém se podařilo vyřešit snížením přesnosti výpočtu, avšak s minimálním dopadem na výslednou přesnost identifikace. Výpočet parametrů regulátoru pak byl realizován metodou Kappa-Tau.

Po odhalení kritických míst a jejich programovém ošetření, se automatická identifikace již jeví jako spolehlivá a přesná. Obě metody vykazují stabilně podobné dobré výsledky i při použití rozdílné přesnosti výpočtu.

Seznam literatury

- [1] ÄSTRÖM, K. – HÄGGLUND, T.: *PID Controllers: Theory, Design and Tuning (second edition)*. Research Triangle Park, NC: Instrument Society of America, 1995.
- [2] BALÁTEŠ, J.: *Vybrané statě z automatického řízení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1996.
- [3] BARTCH, H.: *Matematické vzorce*. SNTL, Praha, 1983.
- [4] BOBÁL, V. – BÖHM, J. – PROKOP, R. – FESSL, J.: *Praktické aspekty samočinně se nastavujících regulátorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1999.
- [5] JONÁŠEK, J.: *Laboratorní úloha pro ohřev TUV*, Liberec: TUL, 2007.
- [6] MODRLÁK, O.: *Laplaceova transformace*. Liberec: TUL, 2002.
- [7] MODRLÁK, O.: *Úvod do identifikace*. Liberec: TUL, 2004.
- [8] MOUČKA, M.: Control of Temperature of Service Water, *Journal of Applied Science in Thermodynamics and Fluid Mechanics*, vol. 1, no. 1/2007.
- [9] OLEHLA, M.: *Základy aplikované kybernetiky*. Liberec: TUL, 2005.
- [10] anon.: *LabVIEW for Windows – Tutorial*. Austin: National Instruments Corporation, 1993.
- [11] anon.: *LabVIEW Code Interface Reference Manual*. Austin: National Instruments Corporation, 2000.

Přílohy na CD

PŘÍLOHA 1: Zdrojový kód programu **autoregulace.c**

PŘÍLOHA 2: Zdrojový kód programu **automaticke serizeni regulatoru.vi**