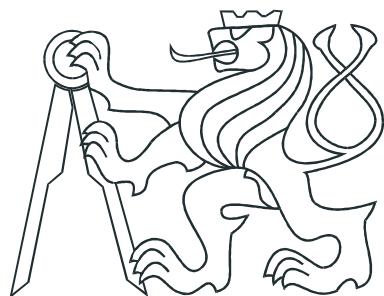


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Řízení vytápění rodinného domu

Praha, 2012

Autor: David Charvát

Prohlášení

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

V Praze dne

podpis

Poděkování

Děkuji především vedoucímu diplomové práce Ing. Lukášovi Ferklovi, Ph.D., za cenné rady, připomínky a náměty, bez kterých by tato práce nemohla vzniknout. Dále děkuji Jiřímu Bečanovi za laskavé svolení k využití jeho domu pro praktickou část této práce. V neposlední řadě děkuji rodině a přátelům za jejich podporu během studia.

Tato práce vznikla za přispění Univerzitního centra energeticky efektivních budov ČVUT.

Abstrakt

Hlavním cílem této diplomové práce bylo navržení regulátorů pro řízení vytápění v rodném domě a jejich zhodnocení. Bylo navrženo několik regulátorů na modelu středně těžké budovy v Matlabu a Simulinku, která disponuje podobnými vlastnostmi, jako je skutečný dům. Regulátory byly porovnány podle několika kritérií a dva z nich implementovány na skutečném domě. Implementované regulátory byly vyhodnoceny dle naměřených dat, meteorologických záznamů a subjektivního pohledu.

Abstract

The main purpose of this master thesis was to design controllers for heating control system in a family house and their evaluation. Controllers were designed on a model of a middle-weight building in Matlab and Simulink. This model has attributes similar to the real house. Controllers were compared by several criteria and two of them were implemented in the family house. Implemented controllers were evaluated by measured data, meteorological records and the subjective view.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. David Charvát**

Studijní program: Kybernetika a robotika
Obor: Systémy a řízení

Název tématu: **Řízení vytápění rodinného domu**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s technickou dokumentací rodinného domu (dodá vedoucí práce) a s možnostmi řízení vytápění.
2. Navrhněte následující regulátory: PID regulace od referenční místořízení, ekvitermní regulace, ekvitermní regulace s PID kompenzací, dvourozměrná ekvitermní regulace s předpovědí počasí. Dále navrhněte dva další regulátory podle svého uvážení. Porovnejte jejich možnosti, potenciál úspor a vhodnost pro daný rodinný dům.
3. Z výše uvedených regulátorů zvolte nejméně dva a ty implementujte v rodinném domě. Výsledky porovnejte a zhodnoťte.

Seznam odborné literatury:

- [1] UNDERWOOD, C. P. HVAC Control Systems – Modelling, Analysis and Design. E&FN SPON, London, 1999.
[2] Technická dokumentace systému TECO

Vedoucí: Ing. Lukáš Ferkl, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2012/2013

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

Obsah

| | |
|---|-------------|
| Seznam obrázků | viii |
| Seznam tabulek | x |
| 1 Úvod | 1 |
| 2 Analýza rodinného domu | 2 |
| 2.1 Testovací dům | 2 |
| 2.2 Analýza zdrojového kódu | 4 |
| 2.3 Model domu | 5 |
| 3 Návrh regulátorů | 8 |
| 3.1 Úvod | 8 |
| 3.2 Termostat | 9 |
| 3.3 Ekvitermní regulace | 11 |
| 3.4 PI regulátor | 14 |
| 3.5 Ekvitermní regulace s PI kompenzací | 20 |
| 3.6 Adaptivní ekviterma | 22 |
| 3.7 Třírozměrná ekviterma s předpovědí počasí | 26 |
| 4 Porovnání navržených regulátorů | 28 |
| 4.1 Úvod | 28 |
| 4.2 Integrál kvadrátu regulační odchylky | 28 |
| 4.3 Integrál mimo pásmo regulace | 28 |
| 4.4 Dodaná energie | 29 |
| 4.5 Porovnání regulátorů | 30 |

| | | |
|-------------------|--|-----------|
| 5 | Implementace v rodinném domě | 33 |
| 5.1 | Nasazené regulátory | 34 |
| 5.2 | Zpracování naměřených výsledků | 36 |
| 5.3 | Zhodnocení | 37 |
| 6 | Závěr | 42 |
| Literatura | | 44 |
| A | Obsah přiloženého CD | I |
| B | Zdrojové kódy | II |
| B.1 | Funkční blok pro regulaci | II |
| B.2 | PHP skript pro zpracování dat | VI |

Seznam obrázků

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | Schema otopné soustavy z (ATEG, s.r.o., 2011) | 3 |
| 2.2 | Schema modelu budovy z (Cigler et al., 2012) | 6 |
| 3.1 | Statická charakteristika termostatu. | 10 |
| 3.2 | Průběhy řízení termostatem. | 11 |
| 3.3 | Blokové schema ekvitermní regulace. | 12 |
| 3.4 | Závislost hodnoty kritéria 3.6 na parametrech. | 13 |
| 3.5 | Průběh řízení optimální ekvitemou. | 14 |
| 3.6 | Regulační obvod s ideálním PID regulátorem z (ÅSTRÖM, K. J. AND MURRAY, R. M., 2008). | 15 |
| 3.7 | Přechodová charakteristika originálního a redukovaného modelu. | 16 |
| 3.8 | Frekvenční charakteristika originálního a redukovaného modelu. | 17 |
| 3.9 | Průběh řízení regulátorem navrženým PID tunerem. | 18 |
| 3.10 | Závislost hodnoty kritéria 3.12 na parametrech. | 19 |
| 3.11 | Průběh řízení regulátorem navrženým experimentálně. | 20 |
| 3.12 | Blokové schema ekvitermní regulace s PID kompenzací. | 21 |
| 3.13 | Závislost hodnoty kritéria 3.12 na parametrech. | 21 |
| 3.14 | Průběh řízení optimální ekvitermy s PI kompenzací. | 22 |
| 3.15 | Blokové schema adaptivní ekvitermy – vlastní regulátor. | 23 |
| 3.16 | Závislost hodnoty kritéria 3.14 na parametrech. | 24 |
| 3.17 | Porovnání klasické a adaptivní optimální ekvitermy. | 25 |
| 3.18 | Porovnání průběhů řízení klasické a adaptivní ekvitermy. | 25 |
| 3.19 | Třírozměrná ekviterma. | 26 |
| 3.20 | Porovnání průběhů řízení klasické (2D) a 3D ekvitermy. | 27 |
| 4.1 | Porovnání regulátorů, kritérium J_1 | 31 |
| 4.2 | Porovnání regulátorů, kritérium J_2 | 32 |
| 4.3 | Porovnání regulátorů, kritérium J_{3a} | 32 |

| | | |
|-----|--|----|
| 5.1 | Rodinný dům v Libáni. | 33 |
| 5.2 | Webové rozhraní pro ovládání navržených regulátorů. | 36 |
| 5.3 | Průběh řízení ekvitemním regulátorem, 28. 11. – 3. 12. | 38 |
| 5.4 | Průběh řízení ekvitemou s PI kompenzací. | 39 |
| 5.5 | Porovnání kritérií nasazených regulátorů. | 41 |

Seznam tabulek

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Tabulka veličin TRNSYS modelu (Cigler et al., 2012) | 7 |
| 4.1 | Parametry porovnávaných regulátorů. | 30 |
| 4.2 | Hodnoty kritérií navržených regulátorů. | 31 |
| 5.1 | Tabulka kritérií nasazených regulátorů. | 40 |
| 5.2 | Porovnání nasazených regulátorů podle denostupňů. | 40 |

Kapitola 1

Úvod

Moderní rodinné domy disponují komplexním systémem vytápění a ohřevu teplé užitkové vody. Systém může zahrnovat řadu zdrojů energie, tradiční kotle a krby, tepelná čerpadla, solární panely a zemní výměníky. To s sebou přináší potřebu složitějšího otopného okruhu a tím i ovládání a regulace. Cílem mojí diplomové práce byl návrh regulátorů pro řízení vytápění v novém rodinném domě na Jičínsku.

První částí této diplomové práce je analýza domu, kde budou regulátory nasazeny. Jedná se o novostavbu, kde probíhají dokončovací práce v interiéru, energetické systémy a rozvody jsou dokončené. Dvoupodlažní rodinný dům disponuje pro vytápění kvalitní tepelnou izolací, dvouokruhovým obvodem s výměníkem a několika zdroji energie. Centrem řídicího systému je programovatelný logický automat (PLC) Tecomat Foxtrot, ke kterému je připojena síť senzorů a akčních členů. Na něm byl implementován firmou Workswell řídicí software. Mým hlavním úkolem ho bylo rozšířit a modifikovat pro použití nově navržených regulátorů.

Druhá část se zabývá návrhem regulátorů. Pro návrh byl využit linearizovaný TRN-SYS (Transient System Simulation Tool) model středně těžké budovy, která je vybavena stropním kapilárním vytápěním, stejně jako skutečný dům. Regulátory byly vybrány s ohledem na možnosti řídicího systému domu. Termostat je již na domě nasazen, ekviterma byla původně plánovaná, ale k její realizaci nedošlo. Dále bylo zvoleno několik modifikací ekvitermy a PID regulátor.

Třetí část obsahuje porovnání navržených regulátorů podle několika kritérií. Kritéria byla zvolena s ohledem na požadavky vytápění, tepelnou pohodu a hospodárnost provozu.

Poslední část popisuje nasazení vybraných regulátorů na skutečném domě, jejich implementaci a vyhodnocení naměřených hodnot.

Kapitola 2

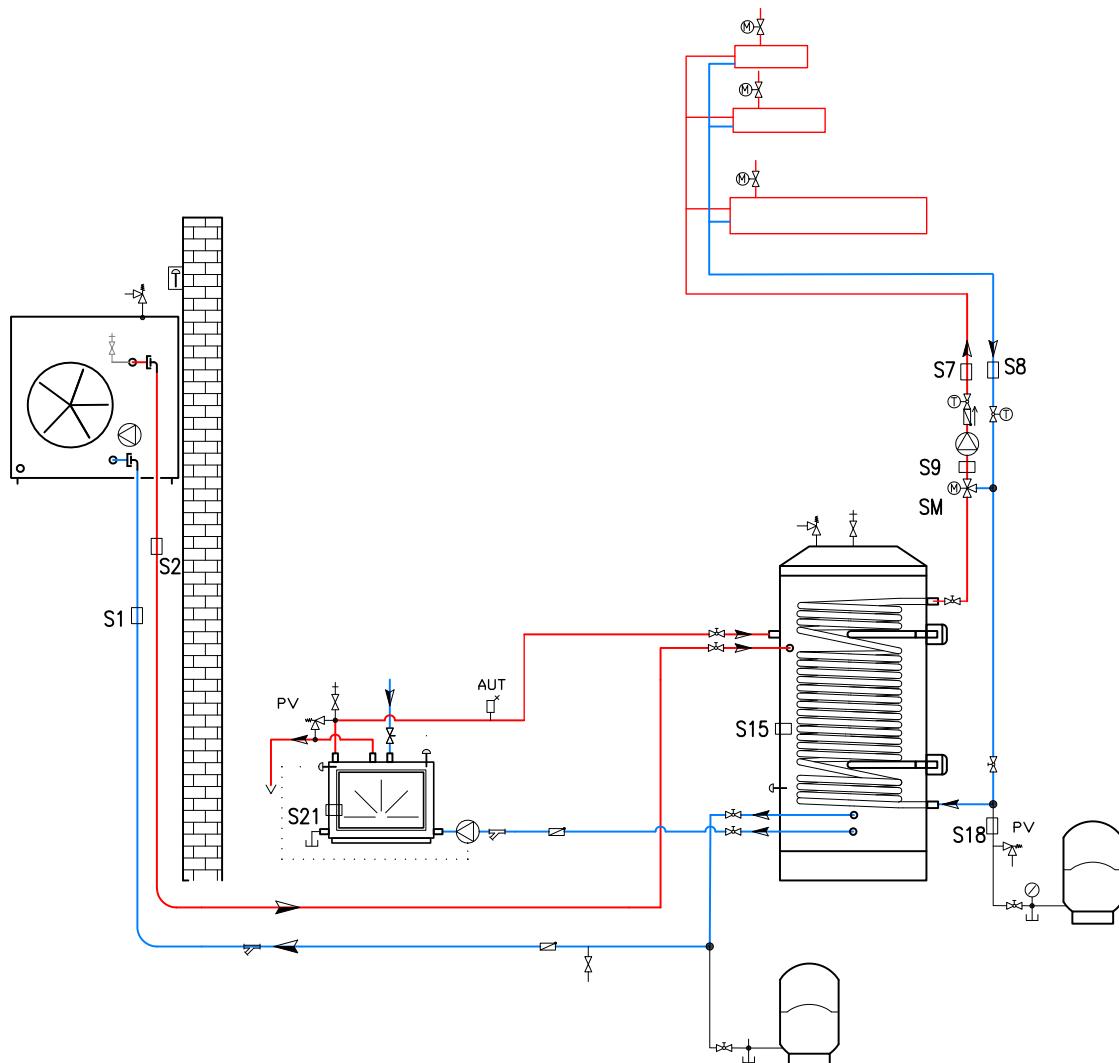
Analýza rodinného domu

2.1 Testovací dům

Rodinný dům, na kterém byly implementovány navržené regulátory, se nachází v obci Libáň na Jičínsku, v oblasti s venkovní minimální výpočtovou teplotou -15°C a průměrným počtem otopných dnů 223. Budova má polohu nechráněnou, osaměle stojící na kraji obce. Jedná se o novostavbu tvořenou dvěma nadzemními podlažími – přízemím a podkrovím. (ATEG, s.r.o., 2011).

Pro vytápění a chlazení domu je navržen systém kapilárních rohoží od firmy Infraclima. Teplotní spád v systému kapilárního vytápění je $36/30^{\circ}\text{C}$. Pro vytápění objektu je použito tepelné čerpadlo vzduch/voda od firmy Carrier, které je umístěno na venkovní fasádě domu. Tepelný výkon tepelného čerpadla je $7,2\text{ kW}$ (při venkovní teplotě vzduchu 7°C a teplotě vody 35°C). Pro pokrytí tepelné ztráty domu při nízkých venkovních teplotách jsou v akumulačním zásobníku umístěny dvě elektropatrony o výkonu $2,4\text{ kW}$ a 4 kW . Jako doplnkový zdroj tepla je použita krbová vložka Schmid, která je napojena na akumulační zásobník. Krb je umístěn v obývacím pokoji. Akumulační zásobník disponuje objemem 300 l a jeho tepelná ztráta je $1,21\text{ kWh}/24\text{ h}$ (ATEG, s.r.o., 2011).

Regulaci a ovládání domu vytvořila firma Workswell. Jedná se o topení v zimním režimu, chlazení v letním režimu, zajištění teplé užitkové vody, ovládání ionizátorů vzduchu, sauny a jezírka. Otopný okruh je rozdělen do dvou okruhů, označené jako primární a sekundární. Primárním okruhem se rozumí okruh se zdroji tepla, které dodávají tepelnou energii do akumulačního zásobníku. Sekundární okruh využívá akumulační zásobník jako zdroj energie a vytápí dům pomocí kapilárních rohoží (WORKSWELL, s.r.o., 2011).



Obrázek 2.1: Schema otopné soustavy z (ATEG, s.r.o., 2011).

Primární okruh v zimním režimu využívá všechny zdroje tepla. Po vyhodnocení teploty v akumulačním zásobníku se vybere otopený prvek. Po jeho sepnutí se čeká přednastavenou dobu a následně se prověří přírůstek teploty. Pokud je přírůstek nedostatečný, připojí se další prvek. Pořadí připojování prvků je následující.

1. Krbová vložka,
2. tepelné čerpadlo,
3. topná patrona 2,4 kW,
4. topná patrona 4 kW.

Algoritmus dále vyhodnocuje další podmínky, nutné pro správný běh, např. zda je dostatečná pracovní teplota pro chod tepelného čerpadla nebo jestli se v krbu topí a je tak možné připojit krbovou vložku. (WORKSWELL, s.r.o., 2011)

Sekundární okruh v zimním režimu zajišťuje vlastní vytápění místností v domě. Výstupní voda z akumulačního zásobníku je podle potřeby přimíchávána do okruhu s rohožemi trojcestným ventilem. Přísun vody do kapilárních rohoží v jednotlivých místnostech regulují dvoustavové termoregulační hlavice, které jsou ovládány termostaty (WORKSWELL, s.r.o., 2011).

V obývacím pokoji by mělo být nainstalováno ještě 5 m^2 topné fólie ECOFILM C 520 s příkonem 200 W/m^2 , protože díky podhledům nebylo možné nasadit stropní kapilární vytápění po celé ploše stropu. Kvůli dokončovacím pracem na domě tomu tak během testování ale nebylo. Obývací pokoj byl díky tomu poddimenzován.

Jako hardware řídicího systému je použito PLC Tecomat Foxtrot, malý modulární řídicí a regulační systém od společnosti Teco a.s. Základ tvorí procesorový modul CP-1000, který disponuje mj. 2 mastery sběrnice CIB, 2 vstupy 230V a 2 reléovými výstupy, dále rozšířitelnou pamětí pomocí paměťových karet, 100 Mbit ethernetem pro komunikaci a programování. Systém je rozšířen dvěma komunikačními moduly CF-1140 a obsahuje SD kartu pro logování a Webmaker. Kompletní dokumentaci lze nalézt na stránkách výrobce (TECO A.S., 2009). Program v PLC, byl vytvořen jako kombinace programovacích jazyků LD (Ladder diagram language, žebříčkové schéma) a ST (Structured Text).

V této práci se budeme zabývat pouze zimním režimem vytápění, konkrétně řízením sekundárního otopného okruhu. Pro řízení primárního okruhu je použita ekviterma navržená firmou Workswell. Řízení dalších částí, případně celého systému, bude předmětem budoucí spolupráce Katedry řídicí techniky a majitele domu, pana Bečana.

2.2 Analýza zdrojového kódu

Nasazené PLC Tecomat Foxtrot respektuje normu IEC 61 131 pro programovatelné řídicí jednotky. Programovací jazyky definuje norma IEC 61 131-3, která je třetí částí z rodiny norem IEC 61 131 a představuje první vážný pokus o standardizaci programovacích jazyků pro průmyslovou automatizaci. Výsledkem je specifikace syntaxe a sémantiky unifikovaného souboru programovacích jazyků, včetně obecného softwarového modelu a strukturujícího jazyka. Tato norma byla přijata jako směrnice u většiny významných

výrobců PLC (TECO A.s., 2007). Vývojové prostředí pro tvorbu a ladění programů nese název Mosaic, také od Teco a.s. (TECO A.s., 2010).

Program pro řízení celého domu, vytvořený firmou Workswell, sestává z hlavního programu a čtyř desítek funkčních bloků a funkcí. Dále je použito několik systémových knihoven Teco, např. BuildingLib, která obsahuje funkční bloky termostatů, FileLib pro práci se soubory, EnergyLib s kalorimetry a elektroměry atd. V hlavním programu jsou použity funkční bloky, které na základě parametrů a řídicích proměnných ovládají jednotlivé subsystémy celého domu. Globální proměnné jsou definovány v souboru **Becan_3.ST** a je jich kolem 500. Mají definovány počáteční stav pro správnou funkci programu po restartu, jsou použity i pro komunikaci mezi funkčními bloky a s webovým rozhraním.

Webové rozhraní je důležitou součástí programu, umožňuje sledování aktuálních hodnot senzorů a parametrů a slouží k ovládání celé technologie vytápění a vzduchotechniky v domě.

Pro tuto práci jsou zajímavé zejména dva funkční bloky pro regulaci sekundárního otopného okruhu a funkční blok pro logování dat. Prvním je **Regulator_OTOP**, který ovládá třícestný ventil podle režimu zima/léto a nastavuje požadovanou teplotu do sekundárního okruhu. Druhým blokem je **OTOP_Kapillary_Zima**. Obsahuje softwarové termostaty, které ovládají hlavice ventilů kapilárních rohoží v jednotlivých místnostech a spíná oběhové čerpadlo sekundárního okruhu. Data jsou ukládána do textového souboru ve formátu CSV na paměťovou kartu v PLC blokem **Logovani**. Díky webovému rozhraní je soubor možné stáhnout přes internet. Modifikace a rozšíření programu je popsána v kapitole 5.

2.3 Model domu

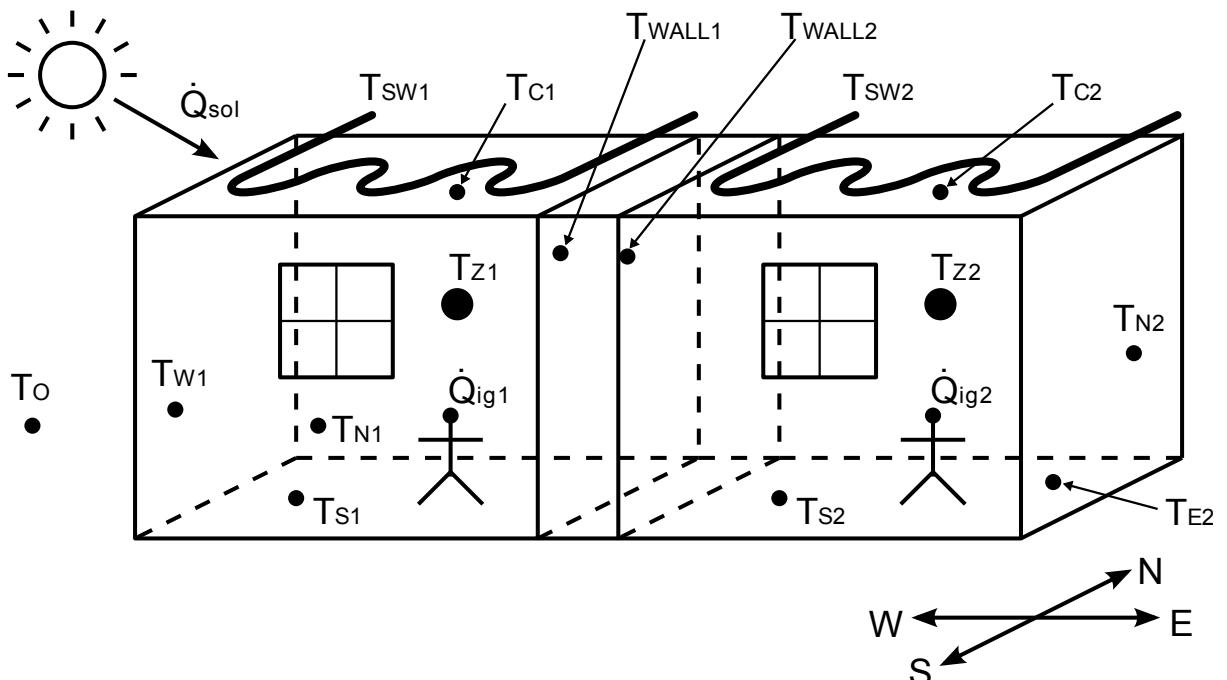
Vytvořit detailní fyzikální model domu převyšuje rozsah této diplomové práce. Proto byl použit zjednodušený model domu s dobrou izolací a kapilárním vytápěním, tj. podobnými technologickými parametry, jako má dům v Libáni. Tento model je typickým představitelem modelů pro studie. Uplatňují se v něm všechny typy přenosu tepla, kondukcí, konvekcí i radiací. Návrh vychází z nelineárního TRNSYS modelu, který byl linearizován a následně identifikován.

Model středně těžké kancelářské budovy (Cigler et al., 2012), viz obr. 2.2, se skládá ze dvou místností o rozměrech $5 \times 5 \times 3$ m s kapilárním vytápěním, pro každou místnost se-

parátním. Kapilární vytápění (Thermally Active Building Systems, TABS) má celou řadu výhod. Dobře využívá nízkopotenciální teplo, například z tepelných čerpadel, návrhová teplota otopné vody je 35°C . Je dobře modelovatelné, odpadají problémy s turbulencemi jako u klasických radiátorů. Přenos tepla je realizován radiací, což je rychlé a pocitově příjemnější, protože člověk je na příjem tepla radiací adaptovaný (od Slunce nebo ohně).

Jedná se o lineární diskrétní model 12. řádu s vzorkovací periodou $\tau_s = 15\text{ min}$. Vstupem pro řízení teploty v modelu domu jsou teploty otopné vody T_{sw1} a T_{sw2} , průtok kapilárami je konstantní. Kapiláry předají (případně odeberou) tepelnou energii do jádra stropu budovy a ta do vzduchu v místnostech. Všechny stavby jsou přesně měřitelné. Poruchovými veličinami se rozumí venkovní teplota, sluneční záření a zisk tepla z místnosti – metabolický tepelný tok lidí uvnitř místnosti.

K dispozici jsou odsimulované poruchové veličiny pro celý rok s profilem počasí, který koresponduje s počasím v Praze. Zisk tepla z místnosti reflektuje typické pracovní dny. Vstupy, výstupy a stavby modelu jsou popsány v tab. 2.1. Ředitelné vstupy jsou označeny indexem „input“, poruchové „dist“ a stavby (totožné s výstupy) „state“.



Obrázek 2.2: Schema modelu budovy z (Cigler et al., 2012).

Tabulka 2.1: Tabulka veličin TRNSYS modelu (Cigler et al., 2012)

| Označení | Popis | Index |
|--------------------|--|----------|
| T_{sw1} | Teplota otopné vody, místnost 1 | input 1 |
| T_{sw2} | Teplota otopné vody, místnost 2 | input 2 |
| T_o | Venkovní teplota | dist 1 |
| \dot{Q}_{sol} | Celkové sluneční záření | dist 2 |
| \dot{Q}_{sol0} | Sluneční záření ze severu | dist 3 |
| \dot{Q}_{sol90} | Sluneční záření z východu | dist 4 |
| \dot{Q}_{sol180} | Sluneční záření z jihu | dist 5 |
| \dot{Q}_{sol270} | Sluneční záření ze západu | dist 6 |
| \dot{Q}_{ig1} | Zisk tepla z místnosti 1 | dist 7 |
| \dot{Q}_{ig2} | Zisk tepla z místnosti 2 | dist 8 |
| T_{c1} | Teplota jádra stropu místnosti 1 | state 1 |
| T_{wall1} | Teplota jádra místnosti 1 na východní straně | state 2 |
| T_{s1} | Teplota jádra místnosti 1 na jižní straně | state 3 |
| T_{w1} | Teplota jádra místnosti 1 na západní straně | state 4 |
| T_{n1} | Teplota jádra místnosti 1 na severní straně | state 5 |
| T_{z1} | Teplota v místnosti 1 | state 6 |
| T_{c2} | Teplota jádra stropu místnosti 2 | state 7 |
| T_{wall2} | Teplota jádra místnosti 2 na východní straně | state 8 |
| T_{s2} | Teplota jádra místnosti 2 na jižní straně | state 9 |
| T_{w2} | Teplota jádra místnosti 2 na západní straně | state 10 |
| T_{n2} | Teplota jádra místnosti 2 na severní straně | state 11 |
| T_{z2} | Teplota v místnosti 2 | state 12 |

Kapitola 3

Návrh regulátorů

3.1 Úvod

Základním požadavkem na funkci regulátorů je sledování reference teploty, respektive udržení teploty v definovaném intervalu. Druhotným požadavkem je hospodárnost. K tomu můžeme využít znalost vlastností domu, údaje z teplotních senzorů v místnostech i vně domu. Z hlediska teorie řízení je dům jako tepelná soustava stabilní, pomalá, odesvý na řídicí signály mohou být v řádu desítek minut až dní. Hlavní měřenou poruchovou veličinou je venkovní teplota, která má na teplotu uvnitř zásadní vliv. Po návrhu regulátorů budou navržena kritéria, podle kterých budou porovnány, viz kap. 4.

Dle (BAŠTA, J. a HEMZAL, K., 2009, str. 25) lze v objektech obecně uplatnit různou regulaci tepelného příkonu. Proto si v úvodu uvedeme alespoň jednoduché rozdělení této regulace. Regulovat příkon tepla lze, jak ukazuje následující rozdělení, podle:

1. výstupní teploty vody ze zdroje tepla,
2. vnitřní teploty vzduchu, a to
 - a) přímo, kdy je regulován přímo zdroj tepla,
 - b) nepřímo, kdy je regulována vstupní teplota vody do otopné soustavy (např. směšováním) a zdroj tepla je regulován samostatně,
 - c) místně, kdy je regulován výkon jednotlivých otopných těles (ploch) a zdroj tepla je regulován opět samostatně,
3. venkovní teploty vzduchu – ekvitemně, resp. podle venkovních klimatických podmínek, a to opět

- a) přímo, kdy je regulován přímo zdroj tepla,
 - b) nepřímo, kdy je regulována vstupní teplota vody proudící do soustavy a zdroj tepla je regulován samostatně,
4. přímovazební regulace, uplatňuje se například jako součást fuzzy a MPC regulátorů.

Při použití regulátorů, které regulují teplotu otopné vody v závislosti na venkovní teplotě vzduchu, tedy při použití ekvitermní regulace dosahujeme úspor tepla vzhledem k původní spotřebě podle druhu objektu 10 až 25 %. Jestliže doplníme tento druh regulace o tzv. zónovou regulaci, úspory tepla se ještě zvýší a dosáhnou hodnot 15 až 30 %. (BAŠTA, J. a HEMZAL, K., 2009, str. 25)

V praxi jsou pro rodinné domy preferovány tradiční a prověřené regulátory, termostat, ekviterma, PID. Výhodou těchto regulátorů je především cena, jednoduchost a nutnost nízkého počtu senzorů teploty. Nasazení regulátorů jako MPC (Model Prediction Control) brání zejména ekonomické důvody. Vytvoření modelu pro konkrétní dům, návrh MPC a nasazení včetně nového hardwaru pro rodinné domy finančně daleko převyšují získané úspory.

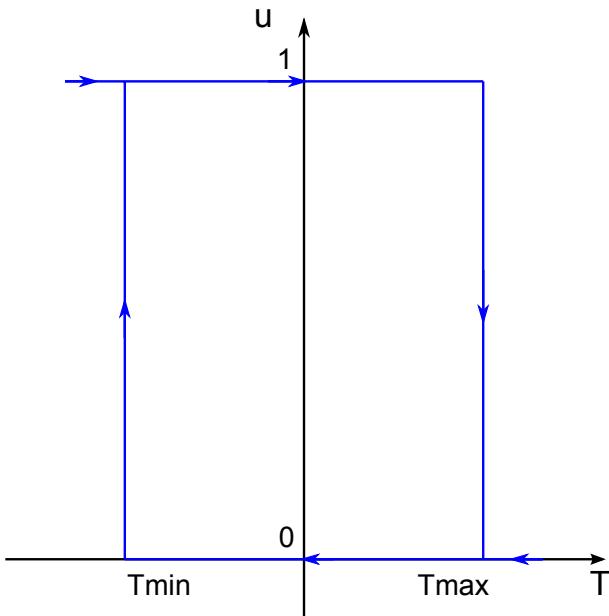
3.2 Termostat

Termostat je tradiční dvoustavový zpětnovazební regulátor běžně používaný pro regulaci teploty. Má jen dva výstupní stavy, vypnuto nebo zapnuto (logická 0 nebo 1, 0% nebo 100%). Jedná se o statický regulátor, nemá vnitřní dynamiku, pro jeho funkci v diskrétní realizaci je nutná paměť pro hodnotu vstupu v předchozím čase.

Jeho parametry jsou minimum a maximum pásma hystereze. Když je hodnota vstupu menší, než minimum, je výstup roven 1, když větší, než maximum, tak je výstup roven 0. V pásmu hystereze je výstup roven výstupu v předchozím čase. Funkci diskrétní realizace termostatu v našem případě lze popsat rovnicí

$$u(k) = (T_z(k) < T_{\min}) \vee \left[(T_{\min} < T_z(k) < T_{\max}) \wedge u(k-1) \right], \quad (3.1)$$

kde T_z [$^{\circ}\text{C}$] je zónová teplota uvnitř místnosti, T_{\min}, T_{\max} [$^{\circ}\text{C}$] minimální a maximální teplota a u výstup termostatu.



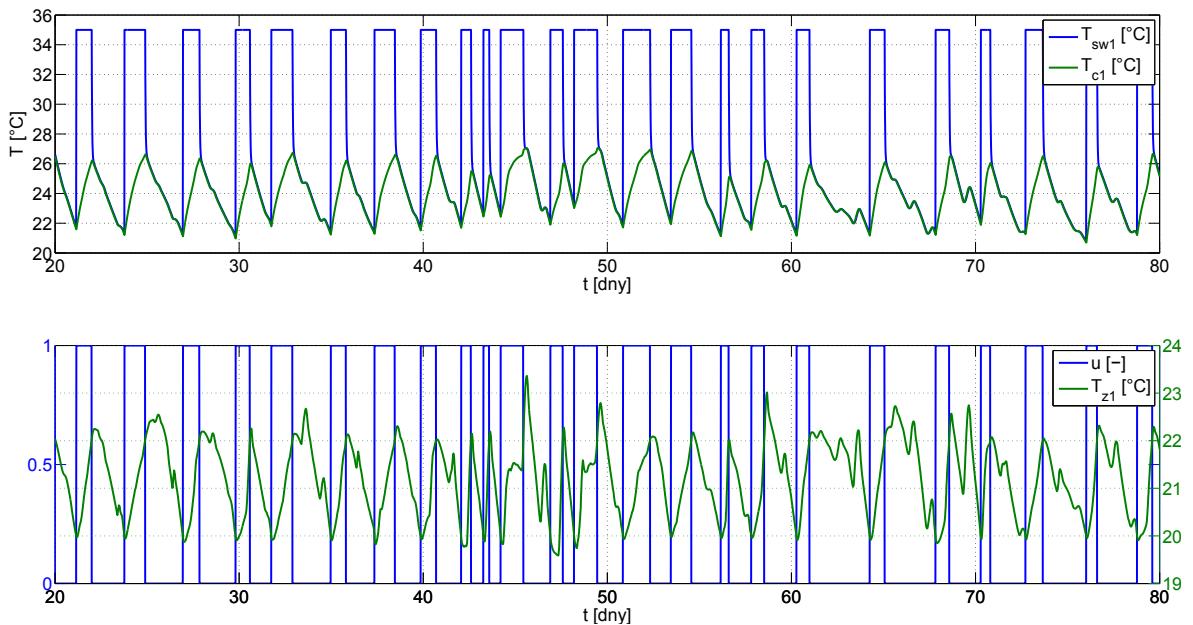
Obrázek 3.1: Statická charakteristika termostatu.

Model domu je navržen pro kvalitativní regulaci, tj. mění se teplota otopné vody a průtok zůstává konstantní (BAŠTA, J. a HEMZAL, K., 2009, str. 5). Proto bylo pro regulaci termostatem nutné doplnit dynamiku kapilárního vytápění při stavu vypnuto, která simuluje chladnutí vody v kapilárách. Vstupem je výstupní hodnota termostatu u a výstupem teplota vody v kapilárách T_{sw} . Teplotu otopné vody v závislosti na hodnotě výstupu termostatu lze popsat jako

$$T_{sw}(k) = \begin{cases} T_{sw0}, & u(k) = 1, \\ T_c(k) \cdot \mathcal{Z}^{-1}\{S_d(z)\}, & u(k) = 0, \end{cases} \quad (3.2)$$

kde T_{sw} [°C] je teplota otopné vody, T_{sw0} [°C] teplota vody dodávané z otopné soustavy, T_c [°C] teplota jádra stropu místnosti a $S_d(z)$ je diskretizovaný přenos chladnutí otopné vody v kapilárách. Jako model byl zvolen diskrétní dynamický systém 1. řádu s jednotkovým zesílením a časovou konstantou $\tau = 30$ min. Vzhledem k vzorkovací periodě modelu 15 minut můžeme zanedbat dynamiku zapínání a vypínání i dopravní zpoždění. Přenos chladnutí otopné vody, diskretizovaný metodou zero-order hold, je tedy

$$S_d(z) = \frac{0,3935}{z - 0,6065}. \quad (3.3)$$



Obrázek 3.2: Průběhy řízení termostatem.

Na obr. 3.2 je zobrazen průběh řízení teploty v referenční místnosti termostatem. Teplota dodávané vody byla zvolena $T_{sw0} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na horní části grafu je její průběh současně s teplotou jádra stropu T_{c1} . V dolní části grafu je zobrazen řídící signál u a průběh zónové teploty v místnosti 1 T_{z1} .

Díky tepelné setrvačnosti se objeví překmit T_{z1} mimo pásmo hystereze $20\text{--}22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jeho průběh je ovlivněn poruchovými veličinami, zejména venkovní teplotou, což je názorně vidět na kolísání T_{z1} v intervalu od 61. do 64. dne.

3.3 Ekvitermní regulace

Ekvitermní regulace řídí dodávání energie podle venkovních klimatických podmínek, zpravidla podle teploty vzduchu. Ekvitermní regulaci dělíme na

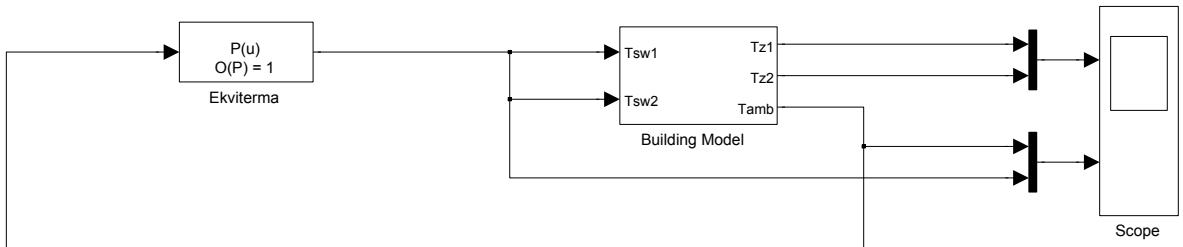
- přímou, kdy je regulován přímo zdroj tepla, a
- nepřímou, kdy je regulována vstupní teplota vody proudící do soustavy (BAŠTA, J. a HEMZAL, K., 2009, str. 25).

V našem modelu je použita nepřímá ekvitermní regulace, tu lze popsát rovnicí

$$T_{sw} = f_{ekv}(T_{amb}), \quad (3.4)$$

kde $f_{ekv}(T_{amb})$ je funkce otopné křivky, zpravidla polynom 1. nebo 2. řádu, s omezením minimální a maximální možnou teplotou otopné vody. Funkce má vlastnost nepřímé úměrnosti – čím nižší je venkovní teplota T_{amb} , tím vyšší je teplota otopné vody T_{sw} . Použití vstupní veličiny, teploty T_{amb} , se v různých regionech liší. V České republice se používá venkovní teplota, v Německu teplota vratné vody z topení a v Belgii rozdíl předešlých dvou teplot.

Dle (BAŠTA, J. a HEMZAL, K., 2009, str. 30), v praxi se při prvním nastavení regulátoru většinou nastaví teplota vstupní vody podle projektu. Správné nastavení otopné křivky se však nedá dosáhnout definováním jediného bodu např. při venkovní teplotě -20°C a odpovídající teplotě přívodní vody 35°C . Pro optimální nastavení regulátoru je potřebné znát správnou polohu otopné křivky. Tu lze zjistit pouze odzkoušením, tj. experimentem zjistit vhodnou teplotu vstupní vody a jí přiřadit křivku v regulátoru. Při tomto pokusu musí být termostatické regulační ventily (TRV) mimo provoz či alespoň zcela otevřeny.



Obrázek 3.3: Blokové schema ekvitermní regulace.

V našem případě byl uvažován polynom 1. řádu, tedy přímka. Tu popisujeme rovnicí

$$T_{sw} = p T_{amb} + q. \quad (3.5)$$

Pro názornost byla během návrhu použita dvojice bodů $(T_{sw1}, T_{amb1}), (T_{sw2}, T_{amb2})$, ze které se koeficienty p a q následně vypočítaly.

V praxi se ekviterma nastavuje nejdříve dle předpokládaných izolačních vlastností budovy a následně se doladuje podle empirických pravidel (VALTER, J., 2010). Máme-li k dispozici model, můžeme nalézt optimální ekvitermu opakovou simulací. Jako

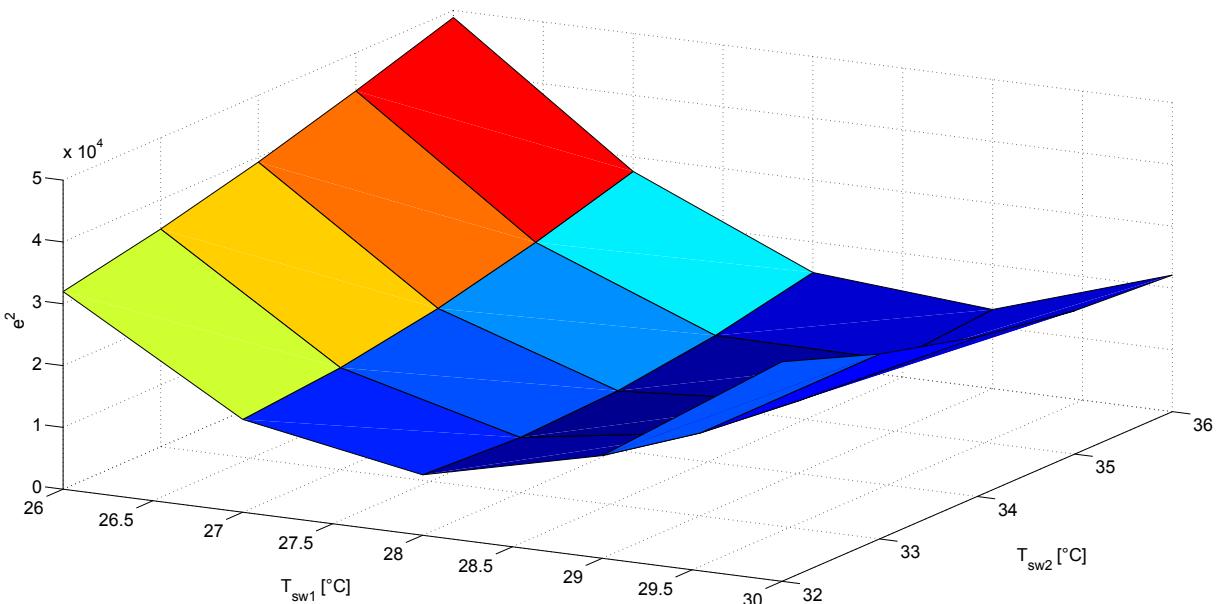
kritérium optimality byl zvolen kvadrát odchylky zónové teploty v místnosti 1 od referenční teploty.

$$\min J = \min e^2 = \min_{p,q} \sum_{k=k_0}^{k_n} (T_{z1}(k) - T_{ref})^2. \quad (3.6)$$

Interval $\langle k_0, k_n \rangle$, přes který se kritérium počítá, byl zvolen tak, že odpovídá v simulaci době od poloviny ledna do poloviny dubna. To zajistí odeznění počátečních podmínek a zároveň je to typická doba topné sezóny, kdy je vytápění používáno. Referenční teplota byla zvolena $T_{ref} = 21^\circ\text{C}$.

Zafixováním parametrů T_{amb1} a T_{amb2} byl problém převeden na hledání minima funkce $e^2 = f(T_{sw1}, T_{sw2})$. Rozsah teplot otopné vody, která byla uvažována, odpovídá reálným hodnotám, používaných v praxi. Simulační cyklus proběhl pro hodnoty $T_{sw1} = \langle 26^\circ\text{C}, 30^\circ\text{C} \rangle$ a $T_{sw2} = \langle 32^\circ\text{C}, 36^\circ\text{C} \rangle$ s krokem 1°C . Jeden krok cyklu pro výpočet e^2 vypadal následovně.

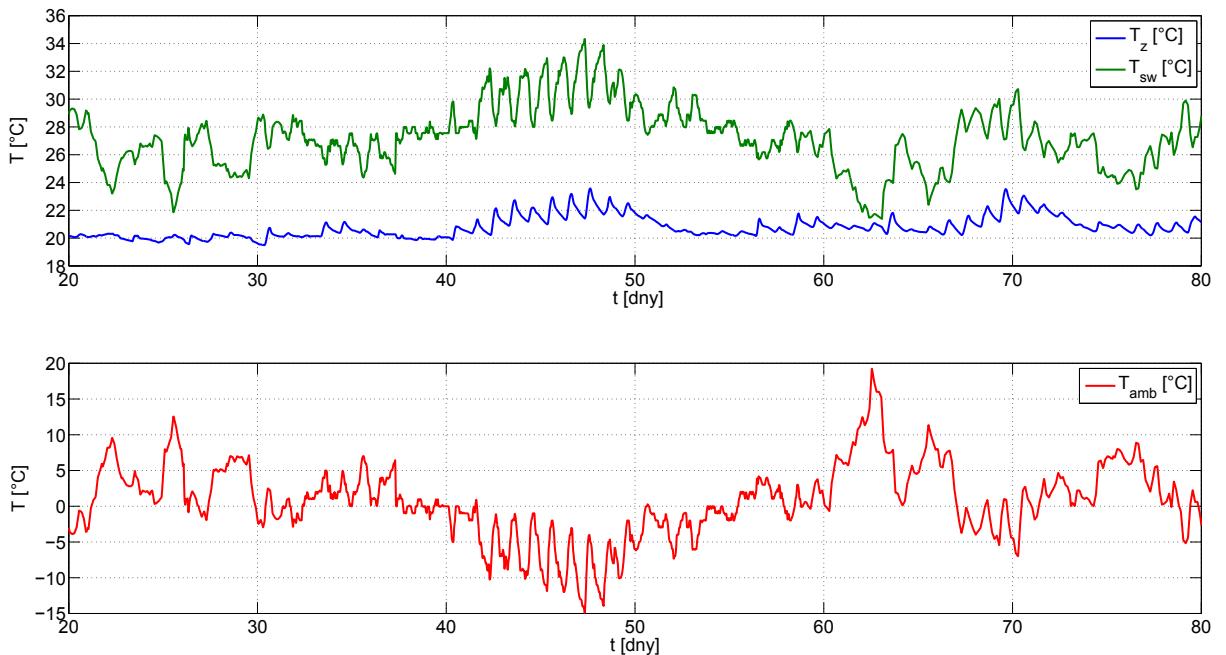
1. Nastavení parametrů T_{sw1}, T_{sw2} ,
2. výpočet parametrů ekvitermní křivky p, q ,
3. simulace,
4. výpočet e^2 pro dané parametry z nasimulovaných hodnot.



Obrázek 3.4: Závislost hodnoty kritéria 3.6 na parametrech.

Minimum bylo nalezeno pro hodnoty $T_{sw1min} = 28^\circ\text{C}$, $T_{sw2min} = 33^\circ\text{C}$, to odpovídá parametrym ekvitermy

$$T_{sw} = k T_{amb} + q = -0,45 T_{amb} + 27,55. \quad (3.7)$$



Obrázek 3.5: Průběh řízení optimální ekvitermou.

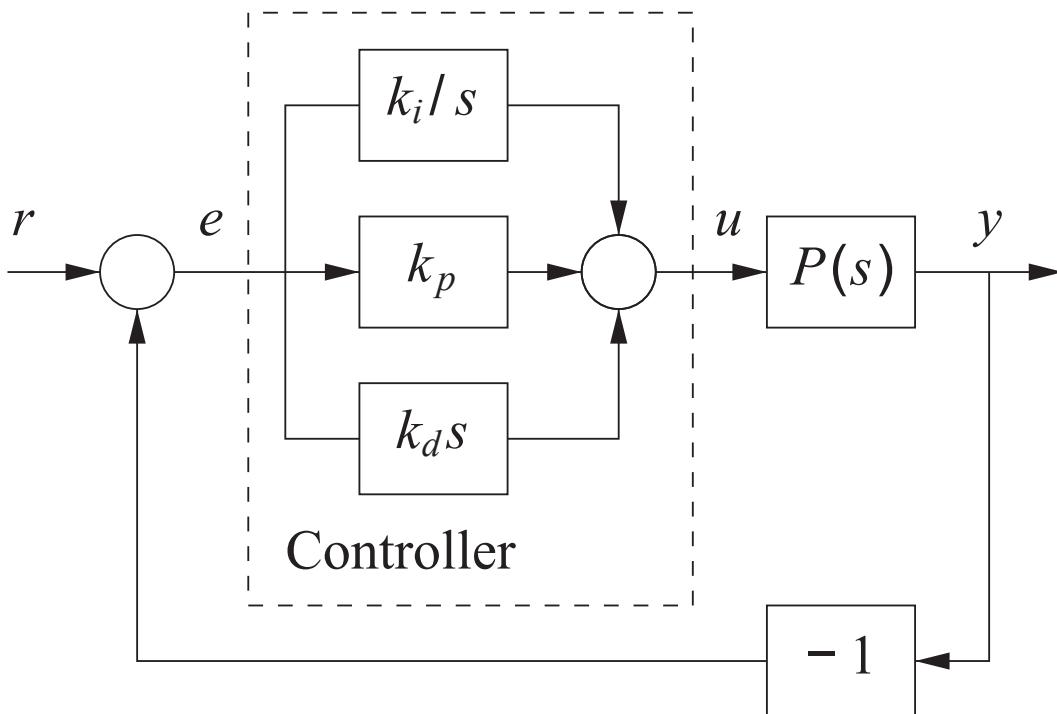
Optimální ekviterma je schopná udržet teplotu v místnosti v rozmezí $\pm 2^\circ\text{C}$ a v 71 % času i v rozmezí $\pm 1^\circ\text{C}$. Z grafu (3.5) je patrné, že na pomalé změny ekviterma reaguje uspokojivě a je schopna vyrovnat i jednorázové rychlé změny venkovních teplot – dny 25, 30, 62. Ale rychlé časté změny (mezi 40. a 50. dnem) díky absenci dynamiky nebo predikce reflektovat nedokáže.

3.4 PI regulátor

PID regulátor je velmi často používaným regulátorem v širokém spektru aplikací. Více než 95 % všech regulátorů v průmyslu je typu PID, většina z nich ve skutečnosti PI, tj. bez derivační složky. Matematicky ho můžeme popsat rovnicí

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt}. \quad (3.8)$$

Vstup do regulátoru je pouze jeden, regulační odchylka, která je dána rozdílem hodnoty reference a regulované veličiny $e = r - y$. Akční zázah je dán součtem tří složek: minulostí reprezentovanou integrálem regulační odchylky, aktuálním stavem (proporcionalní složka) a budoucím stavem, který reprezentuje lineární extrapolaci (derivační složka) (ÅSTRÖM, K. J. AND MURRAY, R. M., 2008).



Obrázek 3.6: Regulační obvod s ideálním PID regulátorem z (ÅSTRÖM, K. J. AND MURRAY, R. M., 2008).

Na doporučení odborníků byl zvolen PI regulátor. PI regulátor navrhneme pomocí dvou metod. Teoretický návrh bude vycházet z metod teorie řízení a experimentální návrh bude analogický k empirickému nastavování.

Pro názornost v teoretickém návrhu využijeme funkci Matlabu `balreal`. Ta vypočítá balancovanou stavovou realizaci systému, tj. gramiaň řiditelnosti a pozorovatelnosti jsou si rovny a jsou diagonální. Funkce také vypočítá tuto diagonálu g . To platí pro stabilní systémy, použitý systém je stabilní. Malé hodnoty g_i , prvků vektoru g , znamenají, že jím příslušné i -té stavy mohou být ze systému odstraněny. Jako vstup použijeme takový subsystém z modelu 2.3, který odpovídá vstupu T_{sw1} a výstupu T_{z1} .

Získaný vektor g obsahuje hodnoty

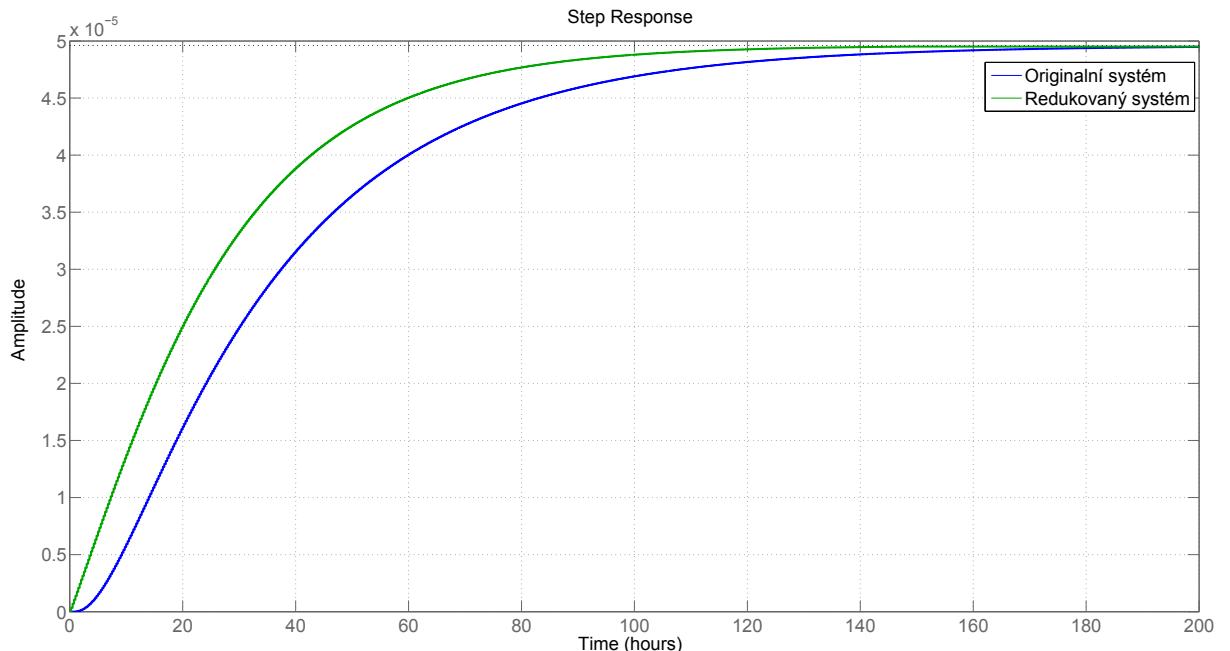
$$g = [2,84 \cdot 10^{-5} \ 3,74 \cdot 10^{-6} \ 8,76 \cdot 10^{-8} \ 3,56 \cdot 10^{-8} \ 2,67 \cdot 10^{-8} \ 1,53 \cdot 10^{-9} \ 4,54 \cdot 10^{-11} \ 8,54 \cdot 10^{-13} \ 1,40 \cdot 10^{-14} \ 6,60 \cdot 10^{-15} \ 1,23 \cdot 10^{-18} \ 4,96 \cdot 10^{-21}]. \quad (3.9)$$

Hodnota g_3 vektoru g je o tři, resp. dva řády nižší, než g_1 , resp. g_2 . Hodnoty jsou v něm seřazeny podle velikosti, takže stavy 3 až 12 můžeme zanedbat. Zjednodušený model bude tedy řádu 2.

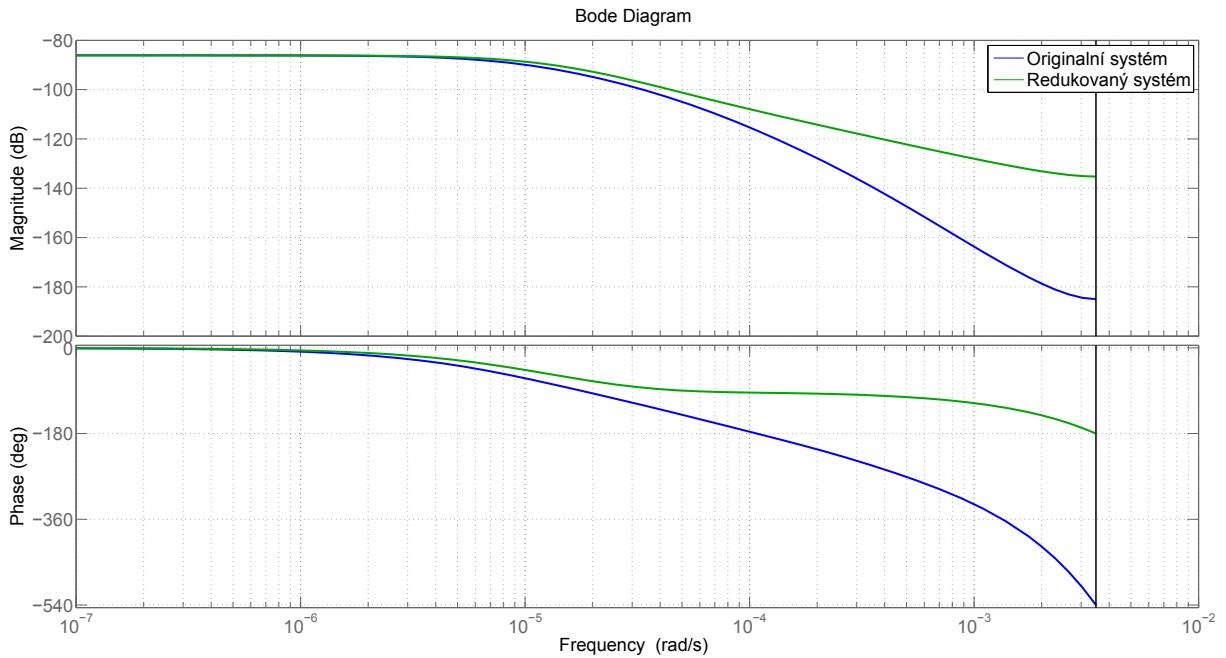
$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 0,9878 & 0,0015 \\ 0,0127 & 0,9754 \end{bmatrix}, & \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} 3,4594 \cdot 10^{-7} \\ 3,5989 \cdot 10^{-6} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}, & \mathbf{D} &= \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Získaný model (3.10) je typu SISO (Single Input Single Output, s jedním vstupem i výstupem), můžeme jej převést na přenos

$$T(z) = \frac{3,4593 \cdot 10^{-7}z - 3,3201 \cdot 10^{-7}}{z^2 - 1,963z + 0,9635}. \quad (3.11)$$



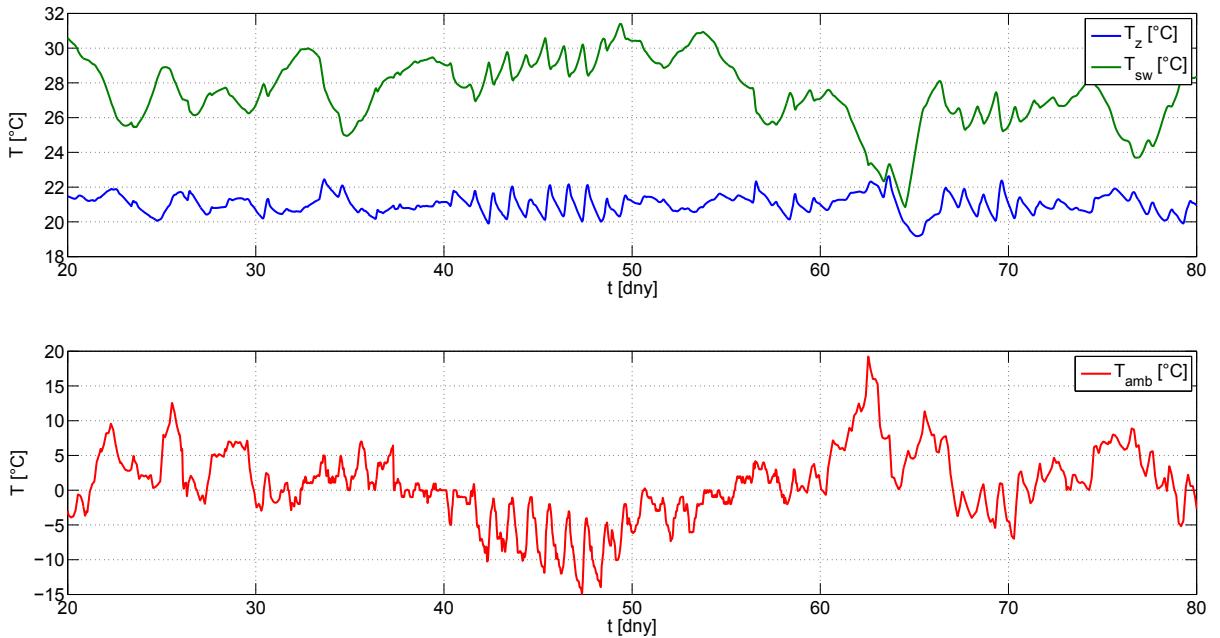
Obrázek 3.7: Přechodová charakteristika originálního a redukovaného modelu.



Obrázek 3.8: Frekvenční charakteristika originálního a redukovaného modelu.

Jak je vidět na obr. 3.8, modely se začínají významně odchylovat okolo frekvence odpovídající 1 h. Můžeme proto očekávat lepší průběh řízení od experimentálního návrhu na originálním modelu, než od teoretického na redukovaném modelu.

Návrh regulátoru byl proveden pomocí simulinkového nástroje PID tuner na redukovaném systému a ověřen na originálním systému s nasimulovanými hodnotami všech vstupů. PID tuner umožňuje nastavení požadované délky časové odezvy a pomocí metod optimálního a robustního řízení vypočítá příslušné koeficienty P a I regulátoru. Bylo zjištěno, že pro zajištění tepelné pohody musí být časová odezva regulátoru řádově v jednotkách hodin, konkrétně v intervalu 3 až 8 hodin. Při delší časové odezvě regulátor ztrácí schopnost reagovat na výkyvy poruchových veličin. Při kratším intervalu soustava začne kmitat a posléze amplituda kmitů začne v čase růst – soustava ztratí stabilitu.



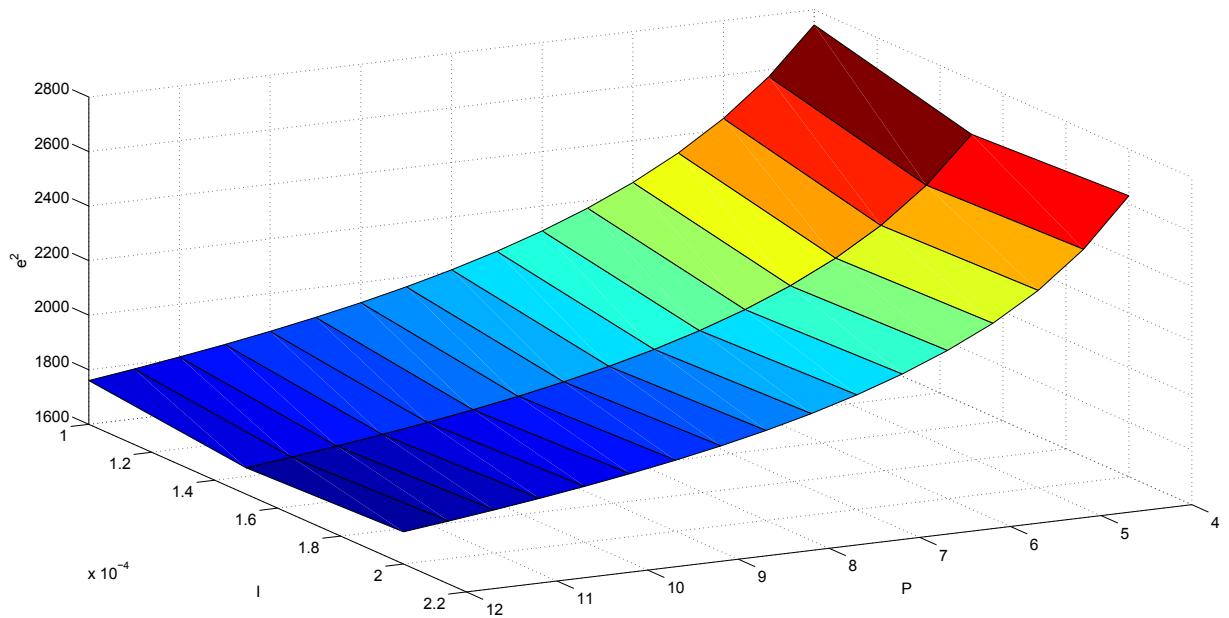
Obrázek 3.9: Průběh řízení regulátorem navrženým PID tunerem.

Na obr. 3.9 je zobrazeno řízení pomocí PI regulátoru, který byl navržen PID tunerem. Doba odezvy byla navržena $T_r = 5$ h, to odpovídá koeficientům $P = 0,75$ a $I = 4 \cdot 10^{-5}$.

Druhým způsobem návrhu je experimentální. Ten je analogický k postupu, použitému v kapitole 3.3. Použijeme kritérium

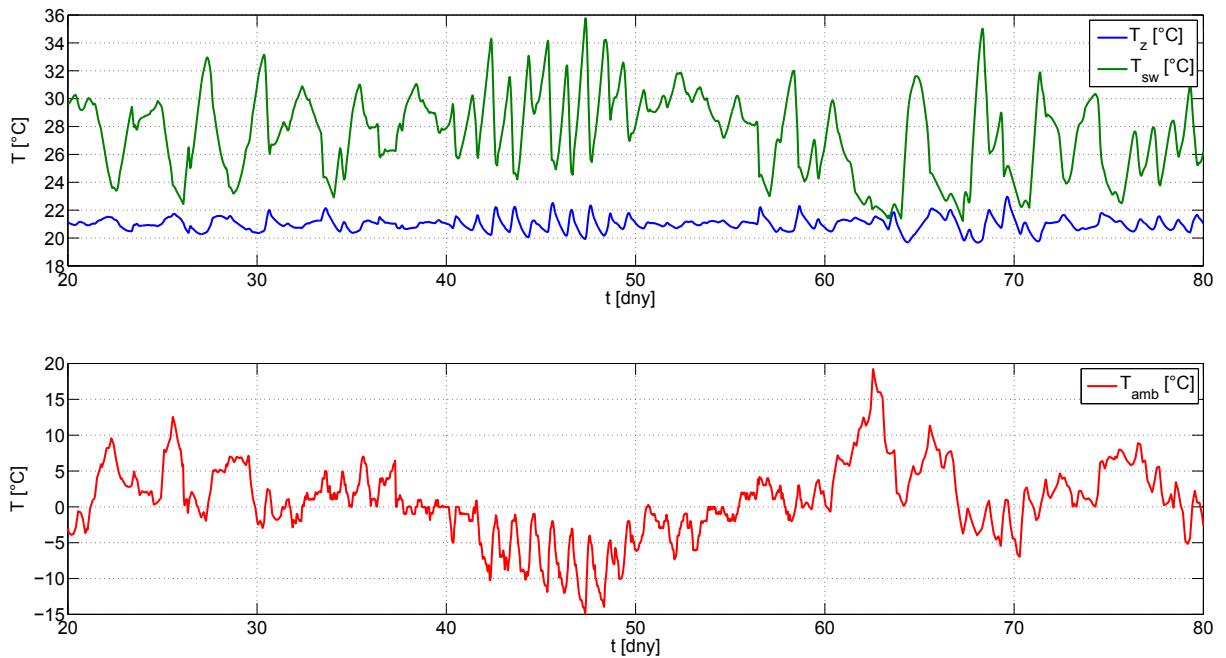
$$\min J = \min e^2 = \min_{P,I} \sum_{k=k_0}^{k_n} (T_{z1}(k) - T_{ref})^2. \quad (3.12)$$

Budeme měnit koeficienty regulátoru P a I v daných intervalech, pro každou kombinaci hodnot spustíme simulaci a vypočítáme kvadrát regulační odchylky jako funkci $e^2 = f(P, I)$. Na závěr nalezneme optimální koeficienty regulátoru P a I tak, že nalezneme minimum funkce e^2 .



Obrázek 3.10: Závislost hodnoty kritéria 3.12 na parametrech.

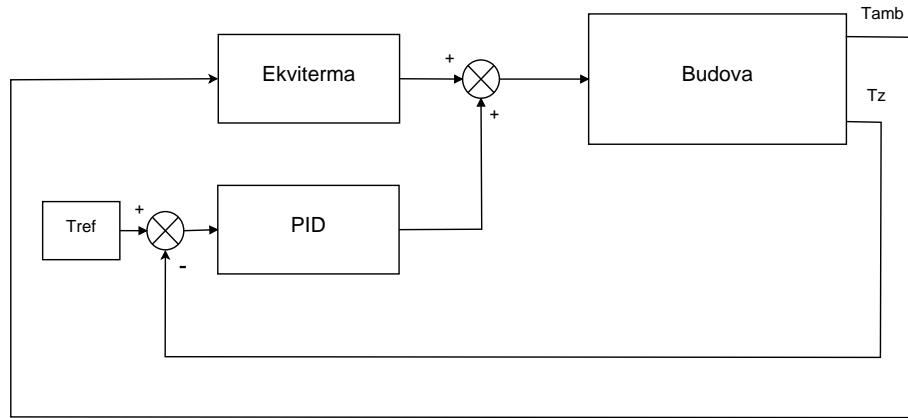
Na obr. 3.10 je patrné, že minimum integračního koeficientu je $I_{opt} = 1,5 \cdot 10^{-4}$. S rostoucím P ale roste i krok akčního zásahu v každém kroku ΔT_{sw} , až za reálně dosažitelné hodnoty. Proto byl zvolena jako maximální možná hodnota $P_{opt} = 4$, která odpovídá změnám $\Delta T_{sw} = 1^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$.



Obrázek 3.11: Průběh řízení regulátorem navrženým experimentálně.

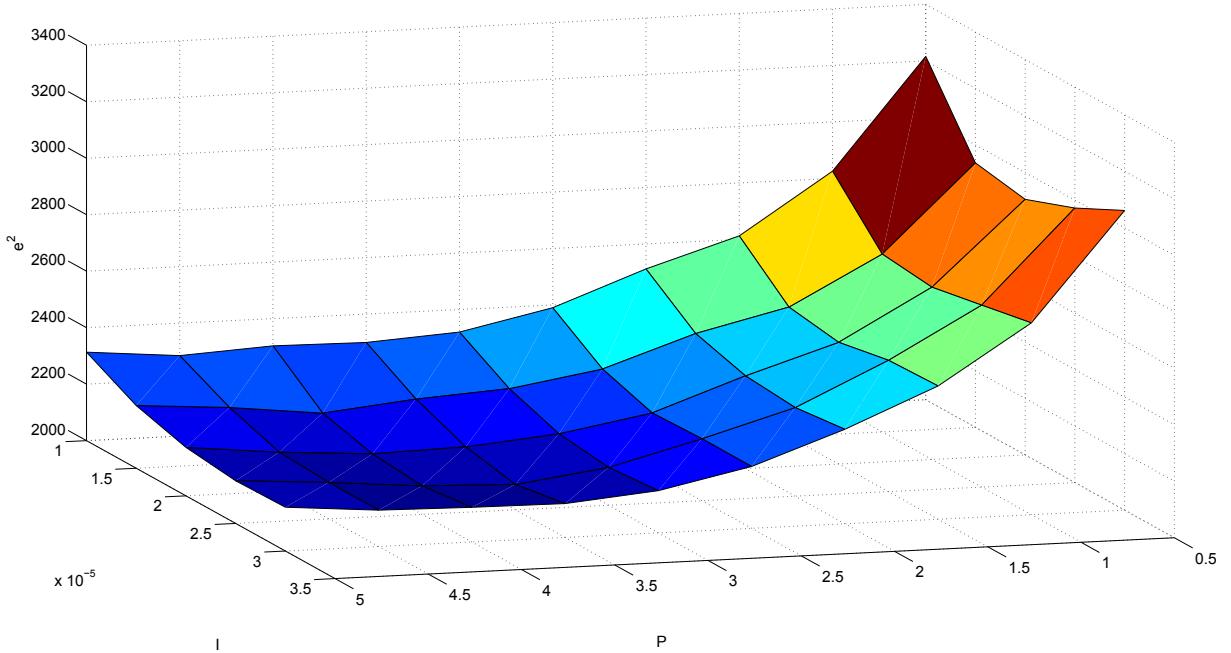
3.5 Ekvitermní regulace s PI kompenzací

Základní nevýhodou klasické ekvitermy je absence dynamiky a zpětné vazby. Proto ji doplníme zpětnovazebním regulátorem typu PI, v konfiguraci viz obr. 3.12. Tím získáme výhody plynoucí ze zpětné vazby, zejména možnost reagovat na naměřenou teplotu v místnosti a snadnou změnu teploty v místnosti pomocí T_{ref} . Je obvykle v rodinném domě požadováno, aby si jeho obyvatelé mohli měnit požadovanou teplotu. Nejčastěji v jedné (referenční) místnosti, případně ve všech místnostech. Jen pomocí ekvitermy to lze zajistit sadou ekvitermních křivek pro jednotlivé diskrétní hodnoty referenční teploty.



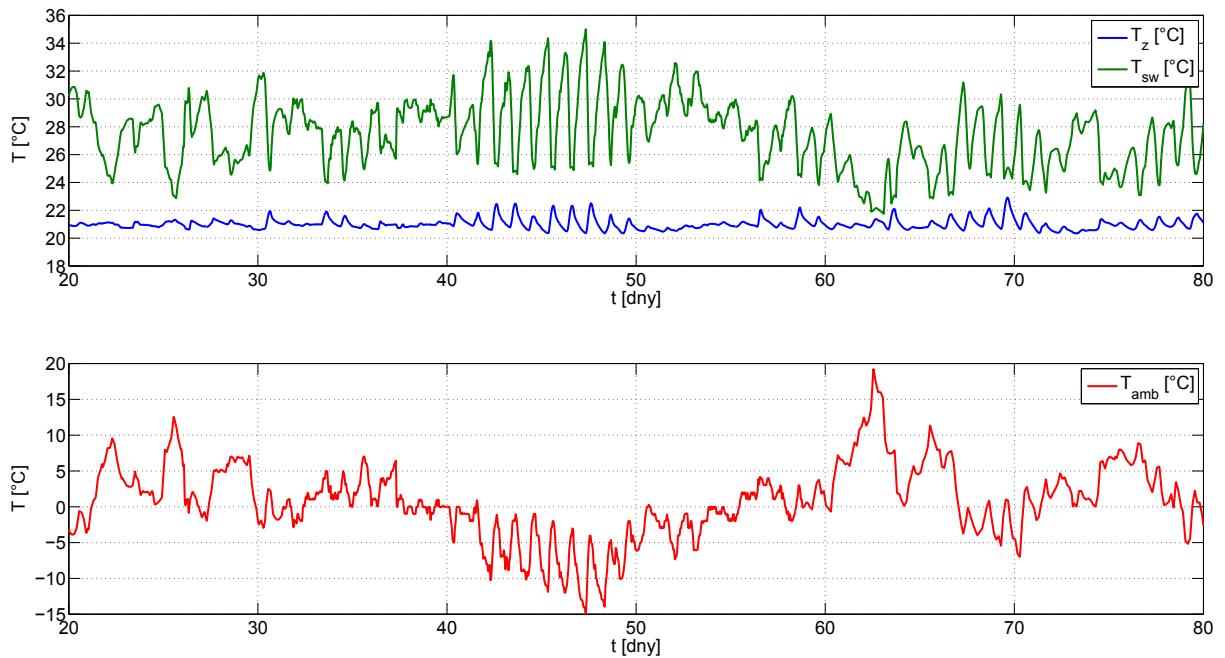
Obrázek 3.12: Blokové schema ekvitermní regulace s PID kompenzací.

Stejně jako v kapitole 3.4 použijeme PI regulátor a experimentální metodiku návrhu. Jako ekviterma byla použita ta, která byla navržena v kapitole 3.3. Tím zajistíme vyplývající hodnotu porovnání navržených regulátorů. U PI regulátoru bylo nastaveno interní pásmo saturace, byl zvolen interval $\langle -10^{\circ}\text{C}, 10^{\circ}\text{C} \rangle$, aby nedošlo k úplnému potlačení vlivu ekvitermy.



Obrázek 3.13: Závislost hodnoty kritéria 3.12 na parametrech.

Minimum kritéria 3.12, které bylo použito pro návrh, odpovídá koeficientům PI regulátoru $P = 3,5$ a $I = 2,5 \cdot 10^{-5}$.



Obrázek 3.14: Průběh řízení optimální ekvitermy s PI kompenzací.

Na grafu obr. 3.14 vidíme, že proti klasické ekvitermě nastalo zlepšení průběhu v tom smyslu, že regulátor udrží po 93 % sledovaného časového intervalu teplotu v rozmezí $\pm 1^{\circ}\text{C}$, to je zlepšení o 22 % oproti klasické ekvitermě.

3.6 Adaptivní ekviterma

Adaptivní regulátory jsou schopné měnit svoje parametry na základě naměřených hodnot. Nápad na vytvoření adaptivní varianty ekvitermy vznikl na Katedře řídicí techniky a mým úkolem je ověřit jeho použitelnost.

Ekviterma byla upravena tak, že polynomální funkce byla nahrazena tabulkou jejích funkčních hodnot $T_{ae}(i)$ s lineární interpolací i extrapolací. Rozsah byl zvolen s ohledem na lokální simulované klimatické podmínky -15°C až 20°C s krokem 1°C .

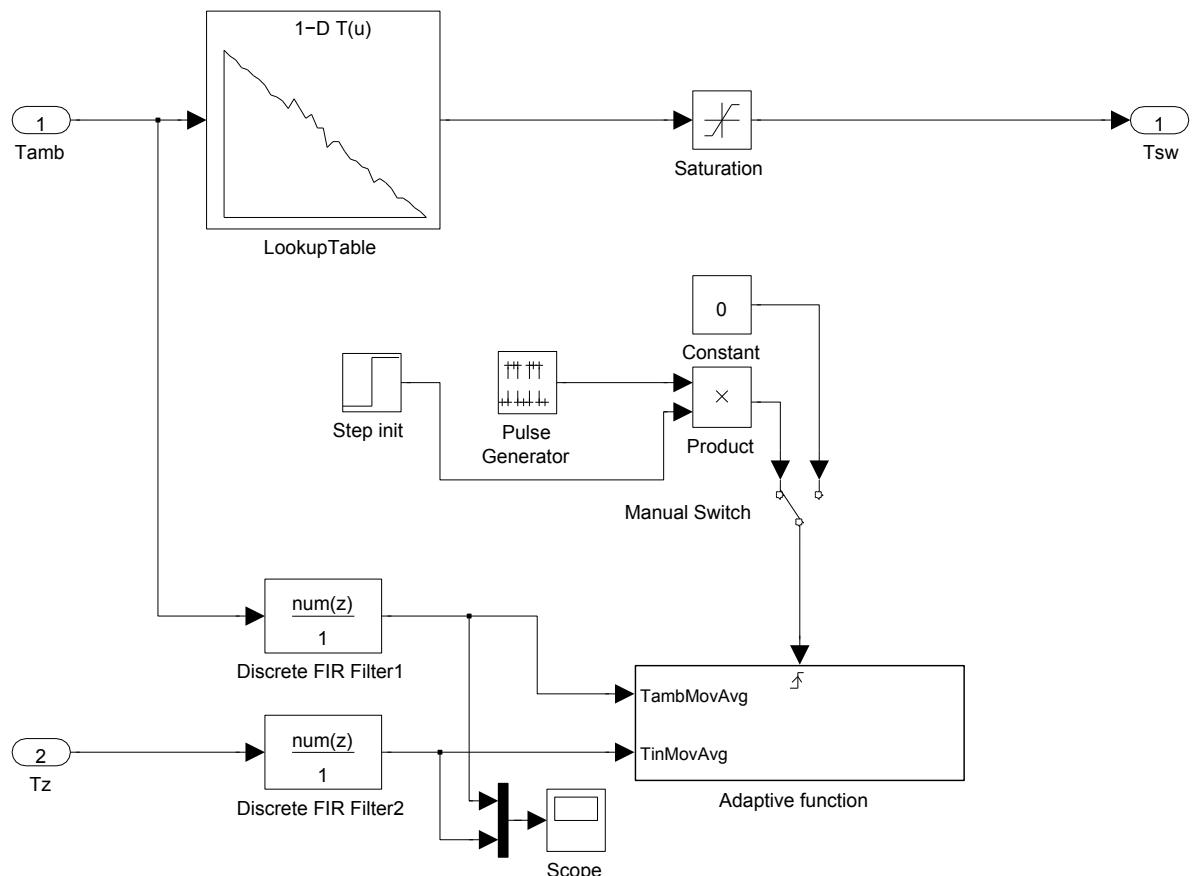
Aktualizace hodnot je prováděna periodicky, periodu τ_{ae} je možné měnit v násobcích vzorkovací frekvence, tj. 15 min. Pomocí FIR filtrů se vypočítá klouzavý průměr vnitřní teploty T_{zM} a vnější teploty T_{ambM} za dobu τ_{ae} a proběhne aktualizace. Vnitřní schema regulátoru viz obr. 3.15.

Aktualizace proběhne tak, že je nalezena hodnota v tabulce nejblíže T_{ambM} , čili na-

lezneme index dané hodnoty i . Příslušná hodnota je aktualizována podle rovnice

$$T_{ae}(i) = -k_a \cdot (T_{zM} - T_{ref}) + T_{ae}(i). \quad (3.13)$$

Hodnota $T_{ae}(i)$ je tedy posunuta o k_a násobek odchylky vnitřní teploty od referenční směrem k ní v každém kroku adaptace.



Obrázek 3.15: Blokové schéma adaptivní ekvitermy – vlastní regulátor.

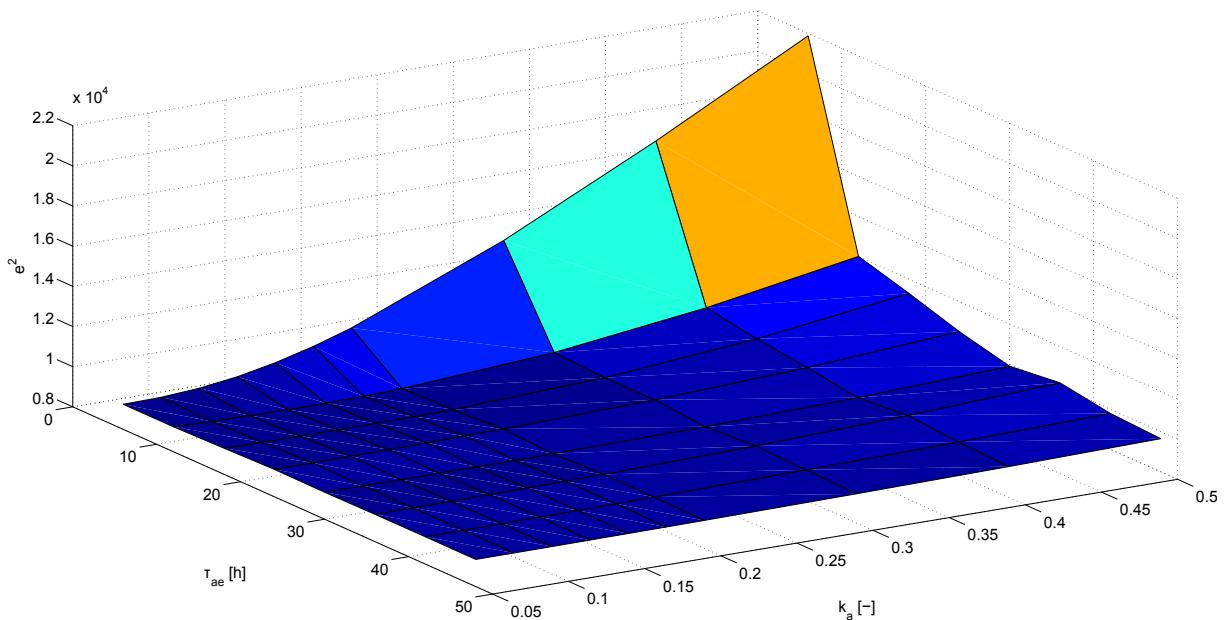
V Simulinku (viz obr. 3.15) je adaptace realizována pomocí S-funkce „Adaptive function“. Ta je spouštěna pulzním generátorem každou periodu τ_{ae} , po odeznění počátečních podmínek, to zajistí blok „Step init“.

Jako základ byla použita optimální ekviterma, která byla navržena v kapitole 3.3. Pak máme dva stupně volnosti pro návrh, periodu adaptace τ_{ae} a koeficient posunu k_a . Jejich optimální hodnoty nalezneme analogicky jako v předchozích případech, zvolíme

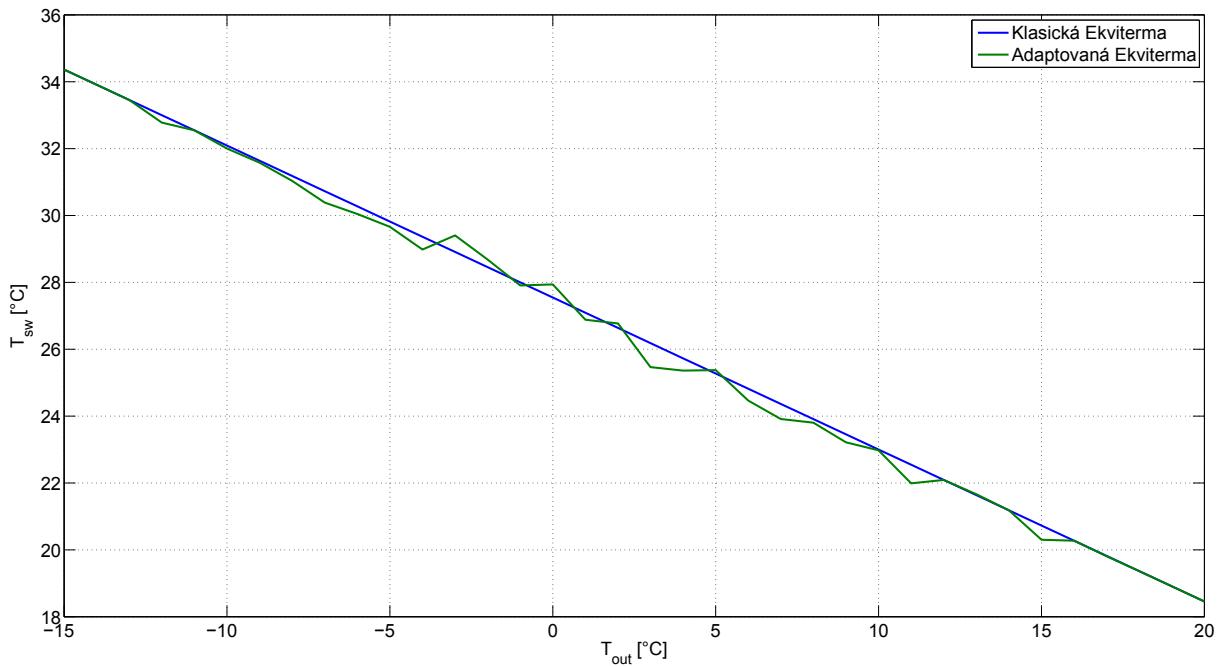
jako kritérium optimality kvadrát odchylky teploty v referenční místnosti od $T_{ref} = 21^\circ\text{C}$.

$$\min J = \min e^2 = \min_{\tau_{ae}, k_a} \sum_{k=k_0}^{k_n} (T_{z1}(k) - T_{ref})^2. \quad (3.14)$$

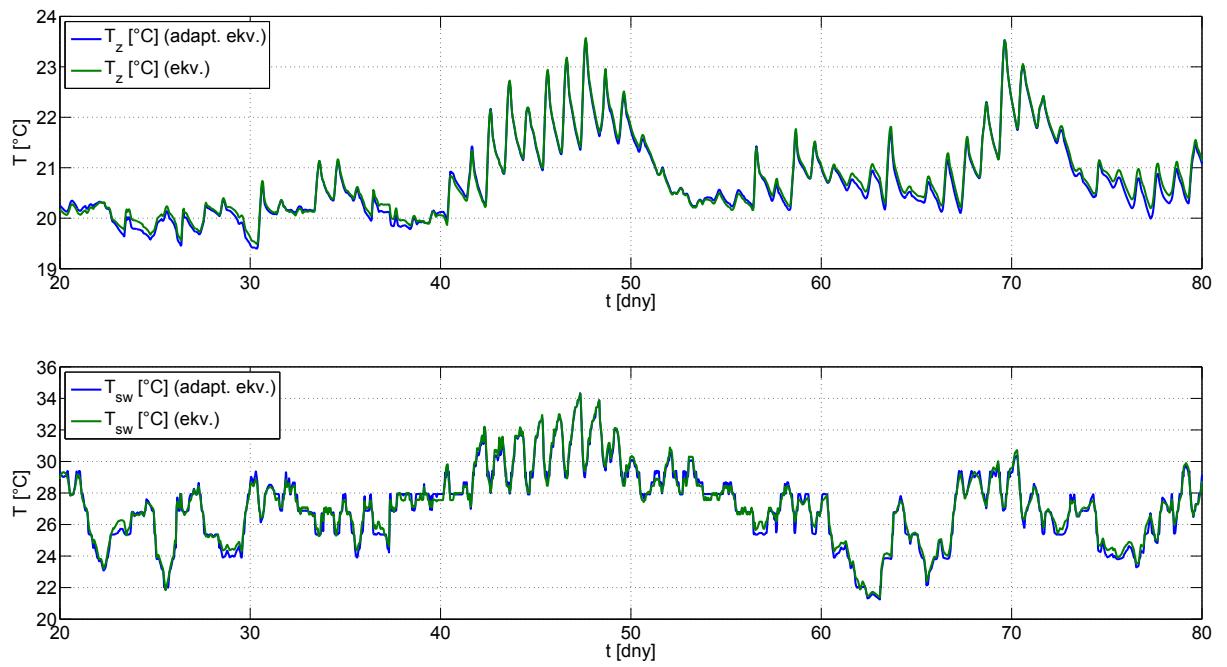
Interval, po kterou byla ekviterma adaptována, byl zvolen od poloviny ledna do konce dubna. Rozsah hodnot τ_{ae} byl zvolen od 6 h do 48 h, rozsah hodnot k_a byl zvolen od 0,05 do 0,5. Výsledek iterací simulace vidíme na obr. 3.16. Minimum bylo nalezeno pro periodu $\tau_{ae} = 12$ h a $k_a = 0,125$.



Obrázek 3.16: Závislost hodnoty kritéria 3.14 na parametrech.



Obrázek 3.17: Porovnání klasické a adaptivní optimální ekvitermy.



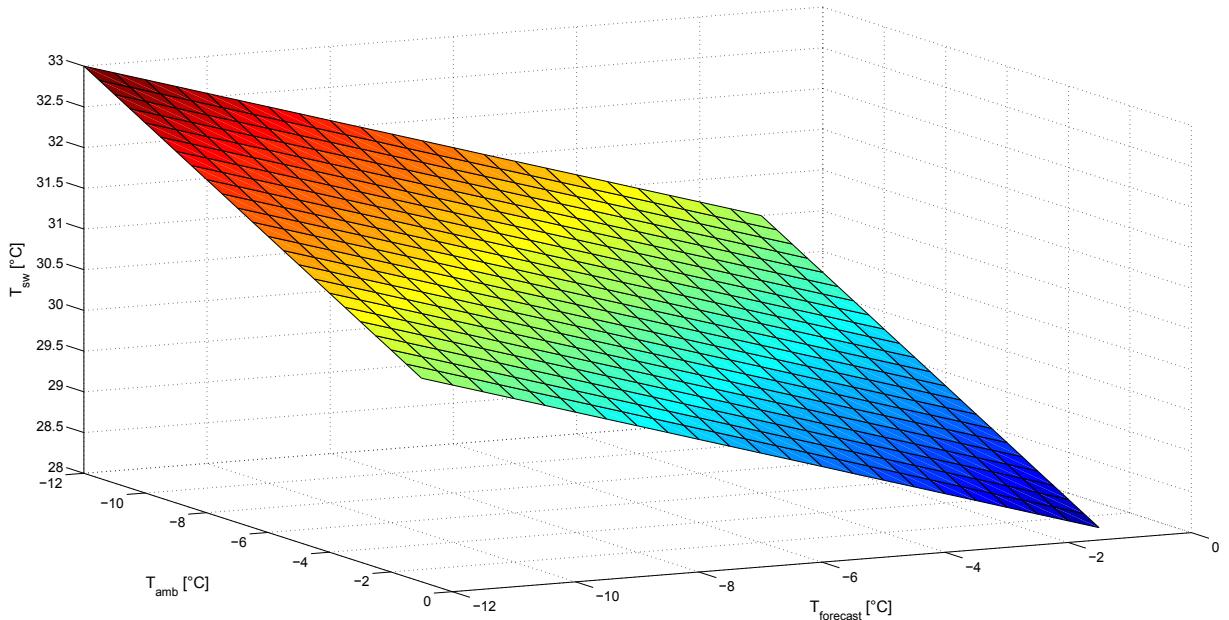
Obrázek 3.18: Porovnání průběhů řízení klasické a adaptivní ekvitermy.

Rozdíl mezi optimální adaptivní a původní ekvitermou není příliš velký. Prvním důvodem je, že původní ekviterma je již optimálně naladěná. Druhý důvod je ten, že

adaptace nezohledňuje předchozí hodnoty teplot, tj. jakou trajektorií se model do daného stavu (vnitřní teploty) dostal. Adaptace se vlastně snaží o identifikaci poruchové veličiny, venkovní teploty. Nezabývá se stavy domu. Tato forma adaptivní ekvitermy je neperspektivní.

3.7 Třírozměrná ekviterma s předpovědí počasí

Třírozměrnou ekvitermu získáme rozšířením klasické ekvitermy o jeden rozměr, který přísluší předpovědi venkovní teploty. Nápad na vytvoření třírozměrné varianty ekvitermy vznikl na Katedře řídicí techniky a mým úkolem je ověřit jeho použitelnost.



Obrázek 3.19: Třírozměrná ekviterma.

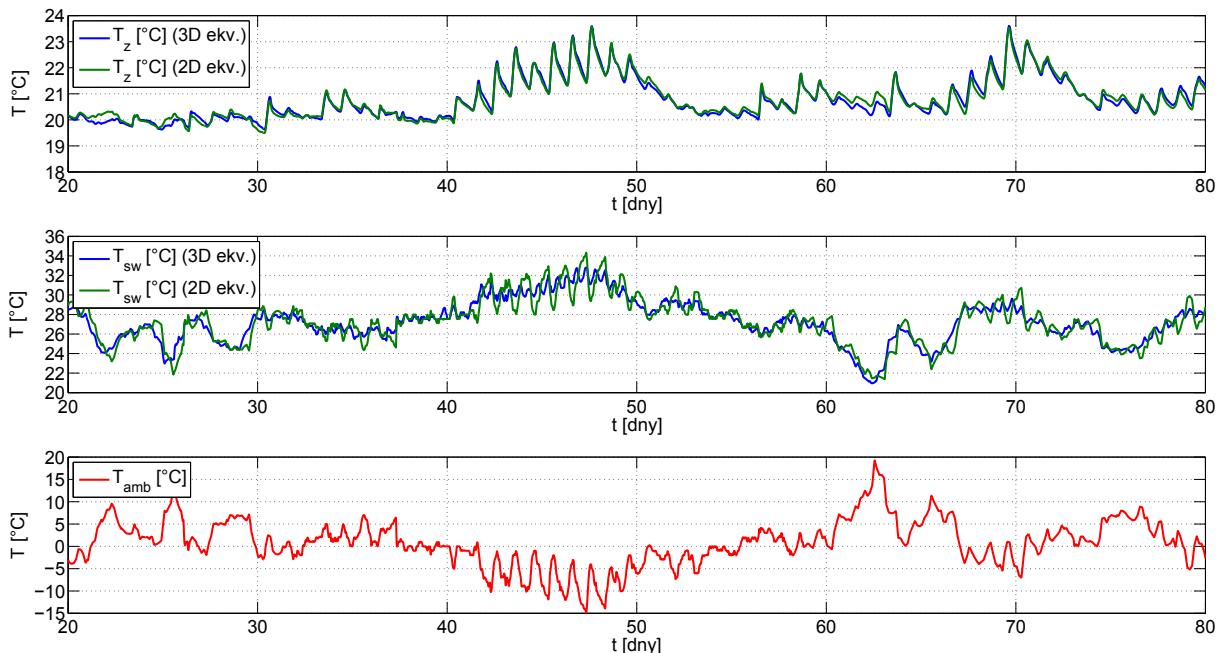
Klasická ekviterma (přímka) v třírozměrné prochází mezi bodem A , kde je T_{amb} a $T_{forecast}$ současně nejvyšší a bodem B , kde je T_{amb} a $T_{forecast}$ současně nejnižší. Třírozměrnou ekvitermu získáme z klasické tak, že k bodům A a B přidáme bod C , který umístíme do poloviny intervalu teplot T_{sw} a do bodu, kde je T_{amb} nejvyšší a $T_{forecast}$ nejnižší. Z trojice bodů (A, B, C) již získáme rovnici roviny třírozměrné ekvitermy pomocí vektorového součinu a dosazením do obecné rovnice roviny.

Výsledkem při použití (3.13) jako původní ekvitermy je rovnice

$$-27,5x - 27,5y - 121z + 3333 = 0. \quad (3.15)$$

Tím zajistíme, že regulátor, ač statický, bude reflektovat predikci venkovní teploty. Při očekávání ochlazení bude regulátor už předem zvyšovat teplotu otopné vody T_{sw} a naopak při očekávaném oteplení bude T_{sw} snižovat.

Důležitým prvkem návrhu regulátoru je volba predikčního horizontu. Experimentálně byly vyzkoušeny hodnoty od několika hodin po několik dnů. Nejlépe se osvědčil predikční horizont $\tau_{fc} = 12$ h. Přičítáme to reflektování denního cyklu teplot. Regulátor eliminoval kolísání T_{sw} zejména v období, kdy se podstatně měnila venkovní teplota v cyklu den–noc. Můžeme najít analogii s klouzavým průměrem, ovšem s predikcí místo zpoždění.



Obrázek 3.20: Porovnání průběhů řízení klasické (2D) a 3D ekvitermy.

Zmenšení rozkmitu výstupu T_{sw} je patrné mezi 40. a 50. dnem, kde je velký rozdíl mezi denní a noční teplotou a ekvitermy na to příslušně reagují, teplota v místnosti T_z se přitom mezi ekvitermami téměř neliší. Na grafu T_{sw} je dále patrná predikce, zejména u větších teplotních změn, tj. před 30. dnem a po 60. dni. Třírozměrná ekviterma začíná zvyšovat T_{sw} s předstihem 12 hodin.

Kapitola 4

Porovnání navržených regulátorů

4.1 Úvod

Regulátory, navržené v kapitole 3, je potřeba porovnat mezi sebou. Kritéria pro porovnání vychází z požadavků na vytápění, tj. tepelná pohoda a energetická náročnost. Protože se jedná o diskrétní systém, integrální kritéria budou místo integrálu obsahovat sumu.

4.2 Integrál kvadrátu regulační odchylky

Prvním kritériem je integrál kvadrátu regulační odchylky. Regulační odchylka je rovna rozdílu teploty v referenční místnosti a referenční teploty. Toto kritérium bylo již použito pro návrh několika regulátorů jako kritérium optimality.

$$J_1 = \sum_{k=k_0}^{k_n} (T_z(k) - T_{ref})^2. \quad (4.1)$$

4.3 Integrál mimo pásmo regulace

Na tepelnou pohodu člověka má vliv celá řada faktorů. Jednou z možných definic je, že tepelná pohoda je stav myslí, jenž vyjadřuje spokojenosť s teplotním klimatem a který vychází ze subjektivního hodnocení (CETNEROVÁ, L., 2000). Pomocí regulace vytápění v domě můžeme ovlivnit teplotu interiérového vzduchu. Pro naše potřeby si tepelnou po-

hodu definujeme jako teplotní pásmo od $T_{pp1} = 20^\circ\text{C}$ do $T_{pp2} = 22^\circ\text{C}$, $T_{pp} = \langle T_{pp1}, T_{pp2} \rangle$. Dále referenční teplotu jako aritmetický průměr hodnot T_{pp1}, T_{pp2} , tj. $T_{ref} = 21^\circ\text{C}$. Pokud bude teplota v místnosti v čase k uvnitř pásma, nebude k celkové hodnotě kritéria přičtena žádná hodnota. Pokud bude mimo pásmo, bude přičtena absolutní hodnota odchylky od referenční teploty. Matematicky to definujeme jako

$$T_{oi}(k) = \begin{cases} 0, & T_z(k) \in T_{pp}, \\ |T_z(k) - T_{ref}|, & T_z(k) \notin T_{pp}, \end{cases} \quad (4.2)$$

$$J_2 = \sum_{k=k_0}^{k_n} T_{oi}(k). \quad (4.3)$$

4.4 Dodaná energie

Energii dodanou vytápěním lze popsat kalorimetrickou rovnicí, ta popisuje výměnu tepla dvou těles v izolované soustavě

$$Q = m_1 c_1 \Delta T_1 = m_2 c_2 \Delta T_2. \quad (4.4)$$

V našem případě jsou daná tělesa otopná voda a jádro kapilárního vytápění. Můžeme předpokládat, že teplota vratné vody je rovna teplotě jádra a průtok otopné vody je konstantní. Dodaná energie v každé periodě je tak úměrná jen rozdílu teploty otopné vody a jádra. Proto můžeme definovat kritérium jako

$$J_{3a} = \sum_{k=k_0}^{k_n} T_{sw}(k) - T_c(k). \quad (4.5)$$

Jádro ale absorbuje energii i odjinud, než z otopné vody, proto toto kritérium v realizaci v Simulinku není vypočítatelné. Neplatí totiž základní postulát, že se jedná o izolovanou soustavu a vnější vlivy nelze zanedbat, naopak mají velký vliv.

Ve skutečném domě je situace příznivější, protože řídicí systém obsahuje kalorimetr pro kapilární vytápění. Ten na základě dat z oběhového čerpadla sekundárního okruhu a teplot otopné i vratné vody počítá dodávaný tepelný výkon P [kW]. Dodaný výkon za dobu regulování získáme integrováním, resp. sumou. Pro lepší vypočítání hodnotu naměřenou hodnotu přenásobíme hodnotou vzorkovací periody v hodinách. Tím získáme výsledek v běžně používaných jednotkách kWh.

$$J_{3b} = \sum_{k=k_0}^{k_n} P(k) \cdot \tau_{vz}. \quad (4.6)$$

4.5 Porovnání regulátorů

V tabulce 4.1 jsou uvedeny parametry všech porovnávaných regulátorů. Referenční teplota u všech regulátorů je 21°C . Základ rozšířených ekviterm (adaptivní, 3D, s PI kompenzací) je vždy ta základní.

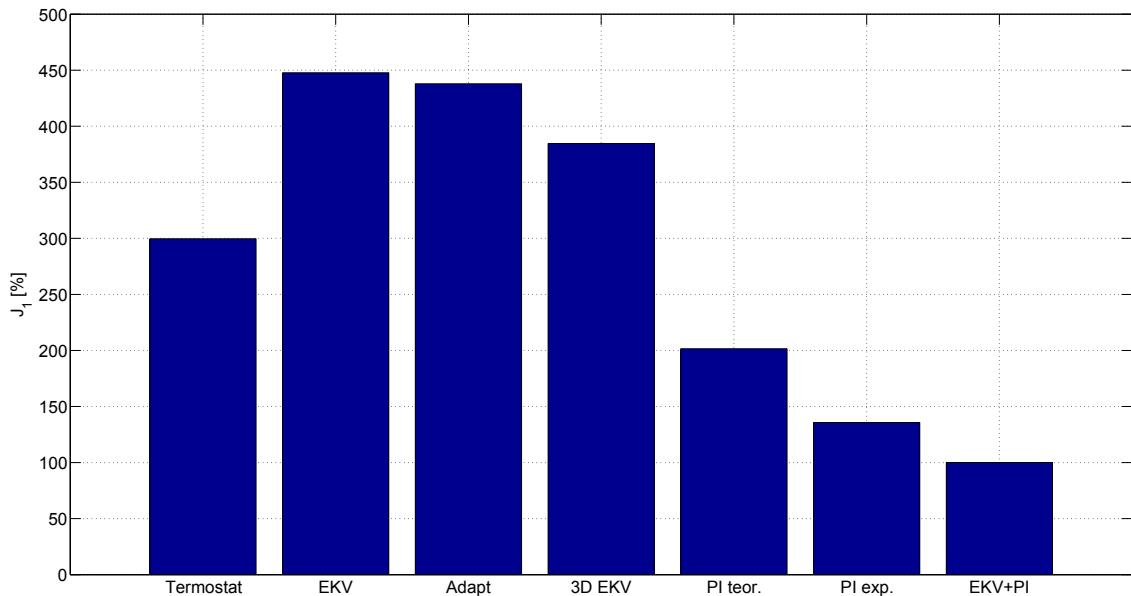
Tabulka 4.1: Parametry porovnávaných regulátorů.

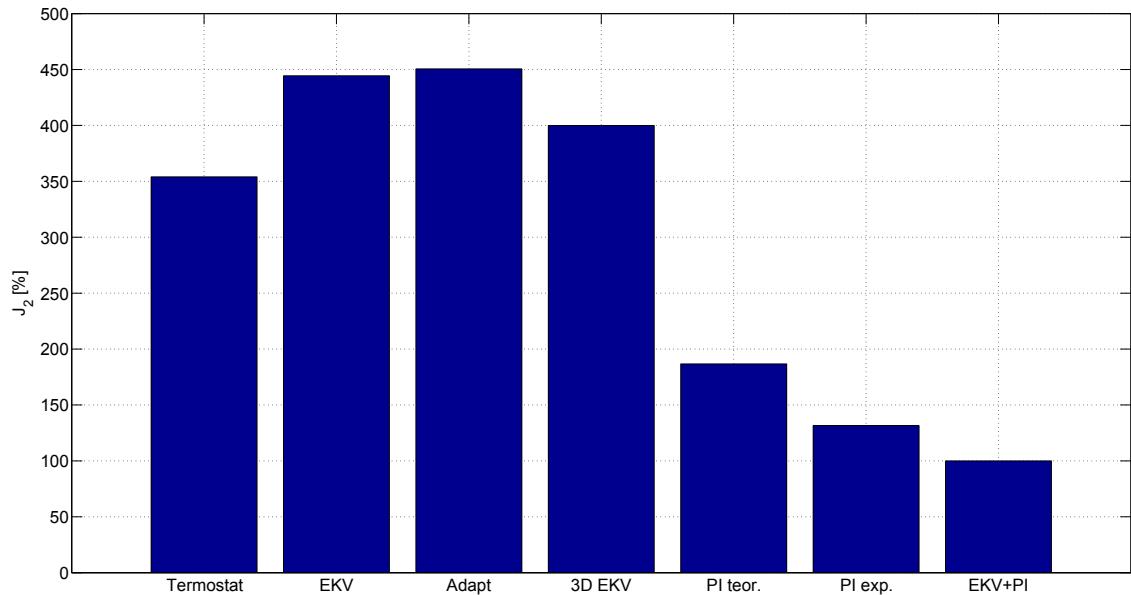
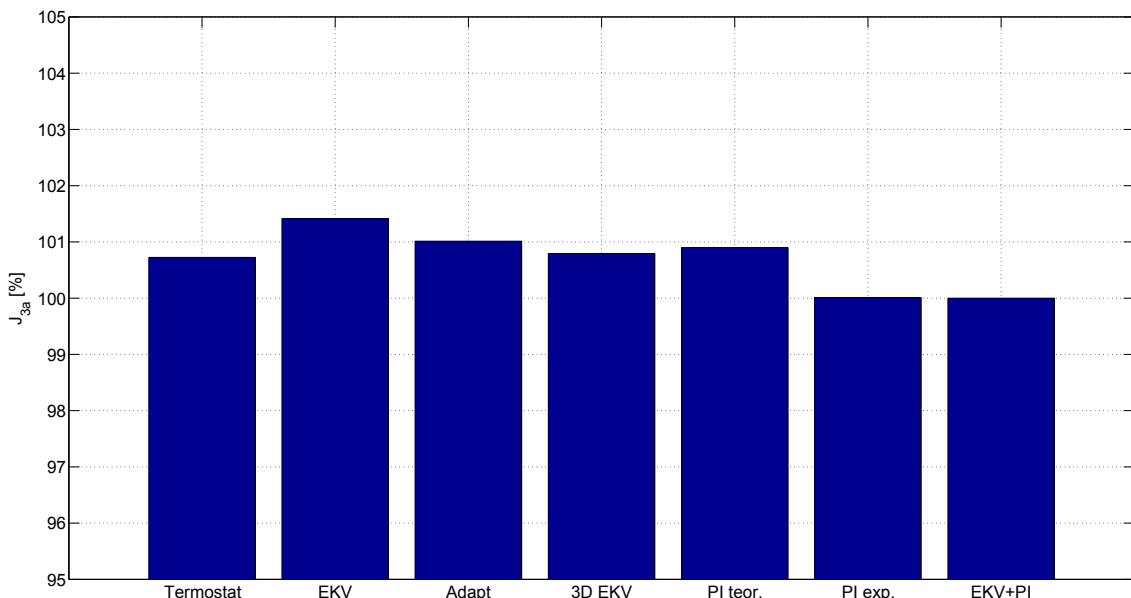
| Regulátor | Parametry |
|----------------|---|
| Termostat | pásмо hystereze $\pm 1^{\circ}\text{C}$ vůči referenci, teplota otopené vody 35°C |
| Ekviterma | koeficienty rovnice $3.5 p = 0,45, q = 27,55$ |
| Adaptivní Ekv. | perioda aktualizace $\tau_{ae} = 12\text{ h}$, koeficient rovnice $3.5 k_a = 0,125$ |
| 3D Ekv. | predikční horizont 12 h |
| PI teor. | $P = 0,75, I = 4 \cdot 10^{-5}$ |
| PI exp. | $P = 4, I = 1,5 \cdot 10^{-4}$ |
| Ekv. + PI | $P = 3,5, I = 2,5 \cdot 10^{-5}$ |

V tabulce 4.2 jsou uvedeny hodnoty všech kritérií pro všechny regulátory. Absolutní hodnoty kritérií jsou pro názornější porovnání převedeny na procenta tak, že 100% odpovídá minimální hodnota a ostatní procentuální hodnoty jsou dány poměrem mezi absolutní hodnotou daného a nejlepšího regulátoru. Pro všechna kritéria platí, že čím menší hodnota, tím je regulátor lepší. Jednotlivá kritéria jsou také vynesena do grafů pro názorné porovnání.

Tabulka 4.2: Hodnoty kritérií navržených regulátorů.

| | Krit. J_1 | | Krit. J_2 | | Krit. J_{3a} | |
|----------------|-------------|--------|-------------|--------|----------------|--------|
| | hodnota | % | hodnota | % | hodnota | % |
| Termostat | 6262,45 | 299,67 | 2967,86 | 354,00 | 27452,0 | 102,62 |
| Ekviterma | 9357,29 | 447,76 | 3725,82 | 444,41 | 27639,4 | 103,32 |
| Adaptivní Ekv. | 10726,40 | 513,28 | 5547,91 | 661,74 | 26752,3 | 100 |
| 3D Ekv. | 8016,71 | 383,61 | 3288,57 | 392,25 | 27480,4 | 102,72 |
| PI teor. | 4148,02 | 198,49 | 1551,85 | 185,10 | 27460,1 | 102,65 |
| PI exp. | 2834,86 | 135,65 | 1102,27 | 131,48 | 27255,7 | 101,88 |
| Ekv. + PI | 2089,79 | 100 | 838,38 | 100 | 27254,7 | 101,88 |

Obrázek 4.1: Porovnání regulátorů, kritérium J_1 .

Obrázek 4.2: Porovnání regulátorů, kritérium J_2 .Obrázek 4.3: Porovnání regulátorů, kritérium J_{3a} .

Obě vypovídající kritéria, J_1 a J_2 , ukázaly, že nejlepší regulátor je dle očekávání ekviterma s PI kompenzací. Následují PI regulátory, termostat a varianty ekvitermních křivek. Nejhůře dopadla adaptivní ekviterma.

Kapitola 5

Implementace v rodinném domě



Obrázek 5.1: Rodinný dům v Libáni.

5.1 Nasazené regulátory

Při konzultaci s vedoucím diplomové práce bylo rozhodnuto, že budou nasazeny dva regulátory, ekviterma a ekviterma s PI kompenzací.

Ve funkčním bloku, který ovládá kapilární okruh, byla původně nastavena teplota do kapilár konstantou na 35°C . Teplotu v jednotlivých místnostech regulovaly softwarové termostaty, které ovládaly hlavice ventilů jednotlivých kapilárních rohoží. Původní konstanta byla nahrazena globální proměnnou `t_do_kapilar_zima`. Ta je nastavována novým funkčním blokem `OTOP_Kapilary_CVUTreg_Zima`. Zbytek bloku nebylo povoleno upravovat, ovládá přímo třícestný ventil a nastavuje požadovanou teplotu, algoritmus byl vytvořen a otestován firmou Workswell.

Nový blok (zdrojový kód viz Příloha B.1) byl naprogramován v jazyku ST a sdružuje všechny tři regulátory. Pro jejich výběr, parametry a nastavení byly přidány další globální proměnné, pro přehlednost označené prefixem `cvutreg_`. Díky tomu lze pro pohodlné ovládání implementovat webové rozhraní, není třeba být připojen přímo k PLC přes programovací prostředí.

Na začátku programu jsou do lokálních proměnných načteny hodnoty vnitřní teploty a venkovní teploty ze senzorů, jako vnitřní teplota (referenční) byla zvolena hodnota ze senzoru v obývacím pokoji. Následuje větev pro uvedení parametrů a nastavení globálních i lokálních proměnných do defaultního stavu. Ta je vymezena příkazem IF a proměnnou, která je ve webovém rozhraní označena jako RESET. To plní i bezpečnostní funkci, v případě potřeby je tak možné rychle nastavit regulátor do defaultního režimu. Defaultním režimem se rozumí původní ovládání jen termostaty s konstantní teplotou do kapilár 35°C .

V dalším kroku jsou načteny globální proměnné, použité ve webovém rozhraní, do lokálních a ověřeno, jestli proměnná `cvutreg_delta_t` nabývá hodnot z definovaného intervalu. Ta určuje předvolbu časovače TON, tedy vlastně vzorkovací periodu regulátoru. Zodpovědnost za rozumné hodnoty u ostatních parametrů je ponechána na obsluze. Pomocí časovače TON (Timer On Delay, softwarová reprezentace relé se zpožděným přítahem) je realizován vstup do větve pro vygenerování výstupní hodnoty bloku, požadované teploty do kapilár. Nejprve je vypočítán blok ekvitermy a pokud je zapnut, tak následně i blok PI regulátoru. Funkční bloky z knihoven Teco se ukázaly jako nevhodné pro testování, byla vytvořena vlastní implementace.

Ekviterma je stejně jako v případě teoretického návrhu lineární funkcí, přímkou. PI regulátor je implementován ve své standardní diskrétní verzi.

```

odchylka := pozadovana_teplota - vnitri_teplota;
integral := integral + (odchylka*cvutreg_delta_t);
pi_y      := (Kp*odchylka) + (Ki*integral);

```

Dále je rozšířen o základní anti-windup, vnitřní proměnná `integral` je omezena hodnotou $\pm 100\,000$ a výstup regulátoru `pi_y` je omezen saturací $\pm 10^\circ\text{C}$.

Nakonec je výstup summarizován dle řídicích bitů, ošetřen proti poškození kapilár (povolená maximální teplota 35°C a zapsán do globální proměnné `t_do_kapilar_zima`. Ta je použita ve funkčním bloku `Regulator_OTOP`, který pomocí třícestného ventilu požadovanou teplotu nastaví.

V nástroji WebMaker pro tvorbu webového rozhraní ve vývojovém prostředí Mosaic byla vytvořena stránka pro ovládání regulátorů, náhled viz obr. 5.2. Graficky vychází z původního konceptu, schváleného a vytvořeného v zakázce firmy Workswell. Umožňuje ovládání parametrů a nastavení konstant regulátorů, obsahuje stručný popis funkce a zobrazuje aktuální výstup regulátoru. WebMaker umožňuje tvorbu webových stránek metodou WYSIWYG a „drag&drop“. Jednotlivé prvky jako texty a pole s tlačítky se umístí přetažením do plochy stránky. Jejich parametry (velikost textu, příslušná proměnná ve vstupním poli atd.) se nastaví pomocí dialogového okna. Zobrazení či možnost ovládání jednotlivých prvků je možné svázat s uživatelskými právy na základě přihlašovacích údajů.

Nastavení regulátoru

Zpět

Všechny ventily kapilár otevřít (ignorovat výstupy termostatů)

RESET:

- nastaví regulátor na termostat
- nastaví defaultní konstanty regulátoru
- vynuluje vnitřní proměnné

Povolit Ekvitermu 1

Povolit PI regulátor 0

Reset integrální složky 0

Perioda regulace [s]

- má vliv i na I složku regulátoru, při změně je třeba upravit konstantu Ki

Konstanty regulátoru

EKVITERMA

teplota_kapilary = a*teplota_venku + b

a: b:

PI regulátor

teplota_kapilary = Kp*e + SUM(Ki*e*dt)

Kp: Ki: Reference:

e = teplota_obyvak - reference

- PI reg. má omezený akční zásah, nelze použít samostatně bez EKV

Výstup regulátoru

Požadovaná teplota do kapilár:

Workswell s.r.o. 2011-2012

Obrázek 5.2: Webové rozhraní pro ovládání navržených regulátorů.

Nakonec bylo třeba upravit funkční blok pro ukládání proměnných Logovani. Vybraná data z PLC jsou ukládána, dle původního nastavení autorů programu, po jedné minutě. Soubor log.csv je umístěn na paměťové kartě v PLC a je tak dostupný ke stažení online. Formát je textový, data jsou oddělena středníkem. Jedná se o 62 proměnných. Pro jejich identifikaci bylo využito technických výkresů otopené soustavy a popisů ve webovém rozhraní, např. proměnná S25 odpovídá venkovní teplotě. Kód byl rozšířen o další dvě proměnné, referenci otopené vody do kapilár a dodávaný výkon do kapilár, které budou použity pro vyhodnocení naměřených výsledků.

5.2 Zpracování naměřených výsledků

Nejdříve bylo nutné získaná data ze souboru log.csv upravit do vyhovujícího formátu, aby mohl být zpracován v Matlabu. Soubor byl totiž od původních autorů programu v PLC vytvořen tak, že všechny data zapisuje za sebou do jedné řádky. Matlab ale vyžaduje

typický tvar CSV souboru, jeden záznam na jednu řádku. Pro tento účel byl vytvořen skript v jazyku PHP (THE PHP GROUP, 2001–2012). Jazyk PHP byl zvolen, protože s ním mám nejvíce zkušeností a umožňuje snadnou práci se soubory a textovými řetězci. Jeho výstupem je HTML, skript lze tak spouštět a ovládat webovým prohlížečem.

Skript je uveden v příloze B.2. Obsahuje třídu `Log`, řídicí direktivu `switch` a HTML výstup. Primární funkce je vytvoření souboru s jedním záznamem na jedné řádce. O záznamu víme, že vždy začíná datumem ve formátu DD.MM.YYYY. Skript načte soubor, vyhledá tento řetězec pomocí regulárního výrazu `/(\d{2}\.\d{2}\.\d{4})/i`, přidá před datum řádkový zlom a výsledek uloží do nového souboru. Jako signalizaci, zda proces proběhl správně, vrátí počet řádků nového souboru. Každý záznam obsahuje 65 hodnot, z nichž je většina pro naše potřeby irrelevantní. Druhou funkcí skriptu je vyseparování pouze požadovaných dat ze záznamu (teplota do kapilárního okruhu, referenční teplota, teplota v referenční místnosti atd.), to zajistí implementovaná funkce `get_subdata()`. Záznamy v daném časovém rozmezí, které přísluší jednotlivým regulátorům, jsou získány pomocí funkce `substr()` nad datumem záznamu a porovnáním s požadovaným časovým intervalom.

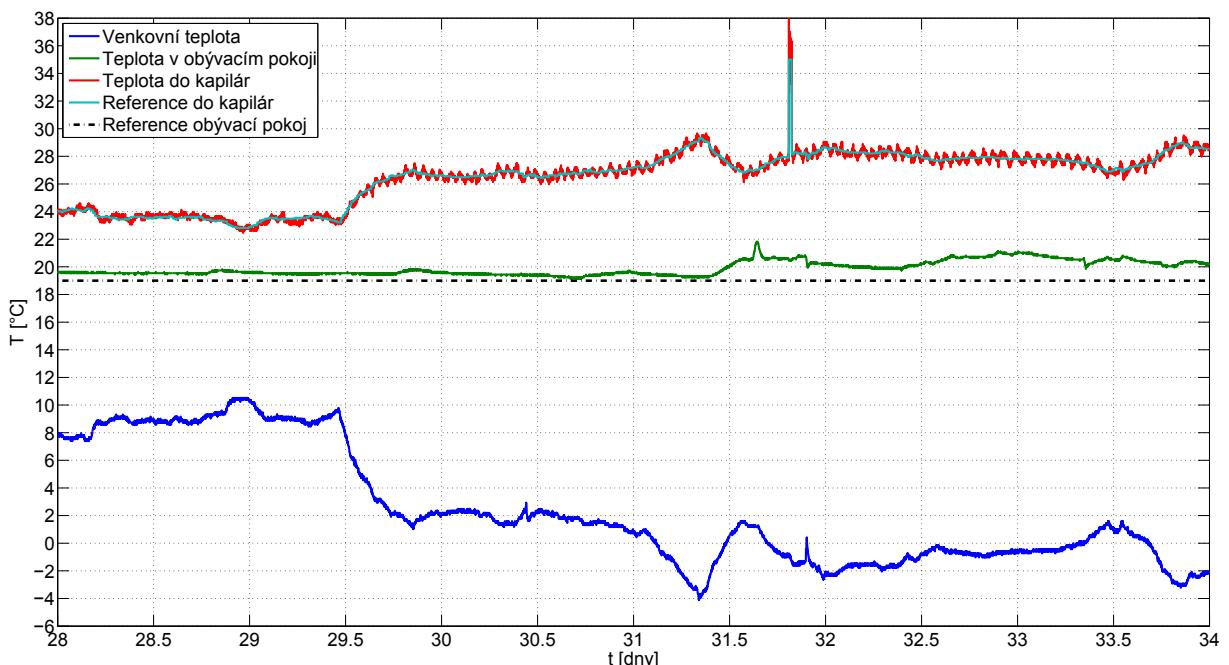
Tak byly získány dva datové záznamy pro dva regulátory – ekvitermu a ekvitermu s PI kompenzací. Každý záznam je dlouhý 6 dní. Neobsahuje přechodový děj, jen ustálený stav. Přechodové děje (nasazení regulátoru) bude zhodnoceno na základě grafů z celkového záznamu. Pro všechny regulátory byla nastavena referenční teplota 19 °C. Zpracována budou tato data:

- venkovní teplota,
- teplota v referenční místnosti (obývacím pokoji),
- požadovaná teplota do kapilár,
- skutečná (naměřená) teplota do kapilárách,
- výkon dodaný do sekundárního okruhu vytápění.

5.3 Zhodnocení

Prvním nasazeným regulátorem byla ekviterma. Byla spuštěna 26. 11. v 13:00 a budeme vyhodnocovat její běh od 28. 11. 0:00 do 3. 12. 23:59, po odeznění přechodových dějů.

Na průběhu řízení na obr. obr. 5.3 můžeme vidět několik podstatných bodů. První je významné ochlazení v poledne 29. 11. Ekviterma na to příslušně reaguje zvýšením teploty do kapilár a teplota v místnosti kolísá jen v intervalu $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ okolo předchozí hodnoty. To je výborný výsledek. Kolísání teplot 1. 12. už znamenalo zvýšení teploty v domě. To bylo ale také způsobeno slunečním svitem, dosud bylo převážně zataženo a v tuto chvíli se vyjasnilo. (iDNES.CZ, 2012) Bylo zjištěno, že stav oblačnosti má na teplotu v domě podstatný vliv, pasivní příjem solární energie je značný. Tento den také nastal výpadek dodávky el. energie v 19:28, což způsobilo restartování řídicího PLC a nastavení defaultních hodnot – termostatického řízení. Manuálně bylo přepnuto v 19:50 opět na ekvitermní řízení, tj. za pouhých 20 minut.



Obrázek 5.3: Průběh řízení ekvitermním regulátorem, 28. 11. – 3. 12.

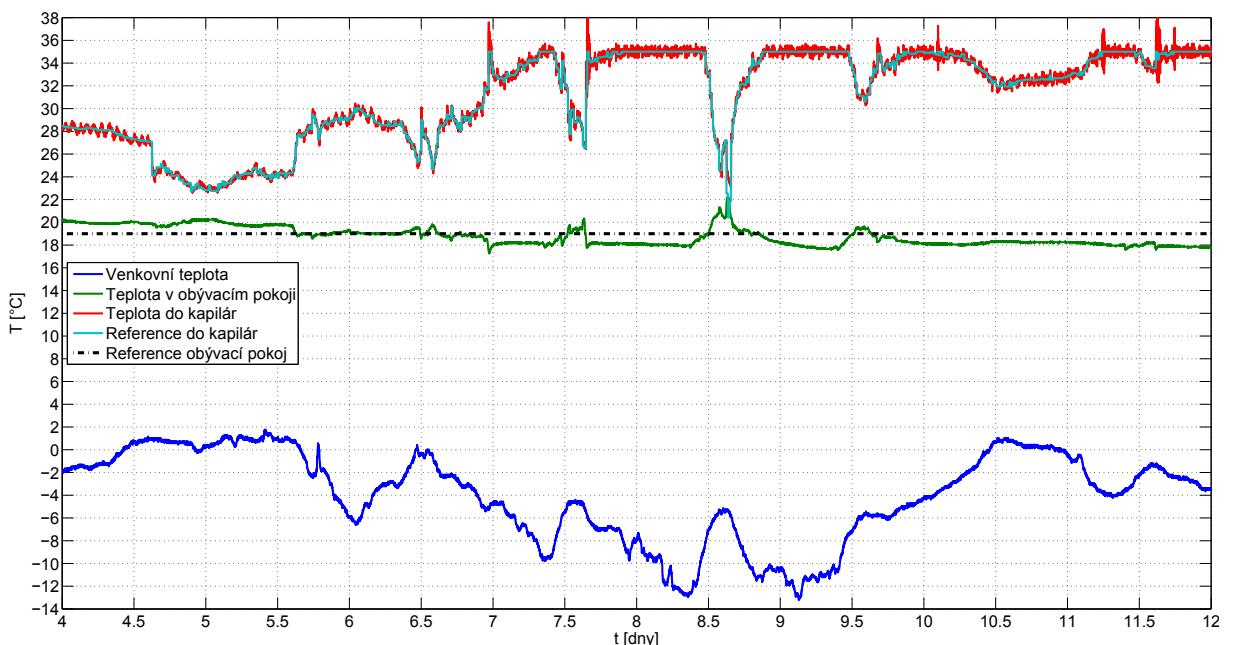
Celkově ekviterma mírně přetápěla, oproti referenci 19°C se teplota v referenční místnosti pohybovala v intervalu $\langle 19,1^{\circ}\text{C}, 21,8^{\circ}\text{C} \rangle$. V pásmu $\pm 1^{\circ}\text{C}$ se teplota v obývacím pokoji pohybovala v 62 % hodnoceného času.

Druhým nasazeným regulátorem byla ekviterma s PI kompenzací. Byla spuštěna 4. 12. v 15:00 a budeme vyhodnocovat její běh od 6. 12. 0:00 do 11. 12. 23:59, opět po odeznění přechodových dějů.

Na průběhu řízení na obr. obr. 5.4 vidíme velkou změnu řídicího signálu při přiřazení PI kompenzátoru, zapříčiněnou P složkou. Regulátor se plně projevil po 24 hodinách.

Dokázal teplotu v referenční místnosti udržet v pásmu $\pm 1^{\circ}\text{C}$ až do poklesu venkovní teploty 7. 12. To se poprvé projevila absence doplňkového vytápění v obývacím pokoji, se kterým je v projektu počítáno. Nejvíce je to patrné na přelomu 8.–9. 12. Regulátor dosáhl maxima povoleného akčního zásahu (venkovní teplota klesla až k -10°C) a přesto nebyl schopen teplotu v referenční místnosti zvýšit na požadovanou.

Regulátor se dokázal vyrovnat i s příjmem energie ze slunečního záření, patrné je to vždy okolo poledne 6.–8. 12. Na dolní mez možností dorazil regulátor jen 8. 12., kdy reálná hodnota teploty do kapilár nemohla klesnout pod teplotu v místnosti. To je dánou fyzickou technologií otopného systému, třícestný regulační ventil úplně zavře přívod teplé vody z výměníku.



Obrázek 5.4: Průběh řízení ekvitermou s PI kompenzací.

V tab. 5.1 je porovnání nasazených regulátorů podle kritérií, navržených v kap. 4. Vidíme, že z hlediska tepelné pohody je výrazně lepší ekviterma s PI kompenzací. A to i přesto, že díky několikrát dorazila na meze akčního zásahu. Energeticky byla náročnější ekviterma s PI kompenzací, ale to bylo dánou nižší průměrnou venkovní teplotou o 7°C . Proto provedeme ještě porovnání, které by toto mělo zohlednit.

Tabulka 5.1: Tabulka kritérií nasazených regulátorů.

| | Krit. J_1 | | Krit. J_2 | | Krit. J_{3b} | |
|-----------|-----------------|-----|-------------|-----|----------------|-----|
| | °C ² | % | °C | % | kWh | % |
| Ekviterma | 9367,2 | 153 | 4919,8 | 216 | 362,3 | 100 |
| Ekv. + PI | 6141,4 | 100 | 2278,7 | 100 | 454,8 | 126 |

Denostupňová metoda je jedním z postupů, které slouží pro návrh, vyhodnocování a porovnávání zdrojů a spotřebičů tepla. Základem metody je znalost průběhů venkovních teplot z meteorologických dat. Počet denostupňů charakterizovaných příslušnou vnitřní teplotou je dán součinem počtu topných dnů a rozdílu průměrné vnitřní a venkovní teploty. (TINTĚRA, L., 2005). Denostupně a jimi vážený výkon vypočítáme podle vzorců

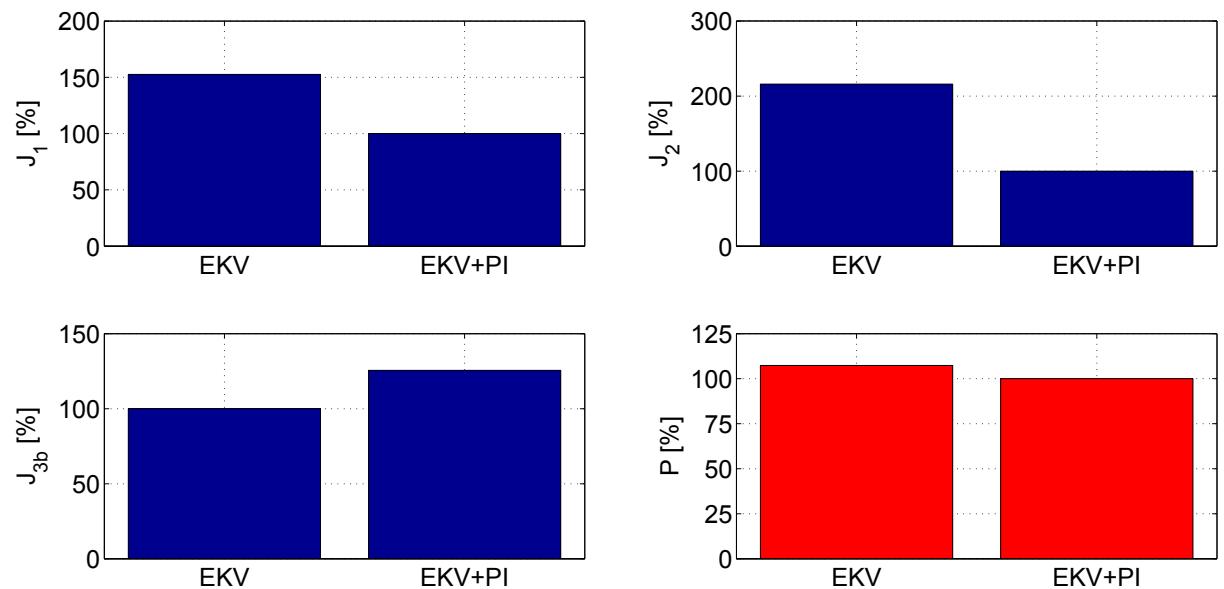
$$D^\circ(T_{is}) = d \cdot (T_{is} - T_{es}), \quad (5.1)$$

$$P = \frac{J_{3b}}{D^\circ}, \quad (5.2)$$

kde d je počet dnů vytápění, T_{is} průměrná vnitřní teplota vzduchu ve vytápěném prostoru a T_{es} je průměrná teplota venkovního vzduchu. V našem případě $d = 6$, ostatní hodnoty viz tab. 5.2. Z porovnání podle denostupňů tak vyšla lépe ekviterma.

Tabulka 5.2: Porovnání nasazených regulátorů podle denostupňů.

| | $D^\circ(T_{is})$ | | T_{is} | | T_{es} | | P | |
|-----------|-------------------|-----|----------|------|----------|-----|-----|--|
| | °C | % | °C | °C | kWh/°C | % | | |
| Ekviterma | 105,1 | 100 | 19,9 | 2,4 | 3,45 | 107 | | |
| Ekv. + PI | 141,6 | 135 | 18,4 | -5,2 | 3,21 | 100 | | |



Obrázek 5.5: Porovnání kritérií nasazených regulátorů.

Kapitola 6

Závěr

Byla provedena analýza rodinného domu v Libáni, zejména jeho otopné soustavy a řídicího systému. Na jejím základě byly zjištěny limity a možnosti řízení vytápění domu. Primárním elementem pro regulaci teploty v sekundárním otopném okruhu je třícestný směšovací ventil. Ovládá jej, stejně jako celý řídicí systém, PLC Tecomat Foxtrot.

Dle požadavků ze zadání bylo navrženo 7 regulátorů na linearizovaném TRNSYS modelu středně těžké kancelářské budovy. Regulátory byly porovnány podle kritérií, které symbolizují nároky na tepelnou pohodu a energetickou náročnost. Nejlépe ze srovnání vyšla ekviterma s PI kompenzací, která kombinuje jak přímovazební, tak zpětnovazební řízení.

Dva regulátory, ekviterma a ekviterma s PI kompenzací, byly implementovány v jazyku ST a zakomponovány do řídicího systému. Poté byly zprovozněny a nakonec byl vyhodnocen jejich běh z naměřených dat v délce 6 dní pro každý regulátor.

Nasazené regulátory byly porovnány podle několika kritérií. Z hodnocení tepelné pohody vyšla výrazně lépe ekviterma s PI kompenzací. Z hlediska energetické náročnosti v absolutních číslech byla méně náročnější ekviterma. Ale po zohlednění venkovní teploty pomocí denostupňů se ukázala výhodnější ekviterma s PI kompenzací. I subjektivně vzato je lepší ekviterma s PI kompenzací, protože dokáže reagovat na rychlé změny venkovní teploty a na silný pasivní příjem energie ze slunečního záření, který je neměřitelný. Můžeme ji tak považovat za nejlepší navržený regulátor.

Literatura

- Cigler, J., Privara, S., Vana, Z., Zacekova, E. a Ferkl, L. (2012), ‘Optimization of Predicted Mean Vote index within Model Predictive Control framework: Computationally tractable solution’, *ENERGY AND BUILDINGS* **52**, 39–49.
- ÅSTRÖM, K. J. AND MURRAY, R. M. (2008), *Feedback Systems*, Princeton University Press. [cit. 2012-11-29], [⟨http://www.cds.caltech.edu/~murray/books/AM05/pdf/am08-complete_22Feb09.pdf⟩](http://www.cds.caltech.edu/~murray/books/AM05/pdf/am08-complete_22Feb09.pdf). ISBN 978-0-691-13576-2.
- ATEG, s.r.o. (2011), Vytápění a chlazení rodinného domu. Dokumentace k topenářskému projektu.
- BAŠTA, J. a HEMZAL, K. (2009), *Regulace v technice prostředí staveb*, Praha. [⟨http://www.fsid.cvut.cz/~bastajir/Basta_Hemzal_Regulace.pdf⟩](http://www.fsid.cvut.cz/~bastajir/Basta_Hemzal_Regulace.pdf).
- CETNEROVÁ, L. (2000), Tepelná pohoda a nepohoda [online]. [cit. 2012-12-01], [⟨http://www.tzb-info.cz/404-tepelna-pohoda-a-nepohoda⟩](http://www.tzb-info.cz/404-tepelna-pohoda-a-nepohoda).
- iDNES.cz (2012), title Počasí iDnes.cz [online]. [cit. 2012-12-16], [⟨http://pocasi.idnes.cz/⟩](http://pocasi.idnes.cz/).
- TECO A.S. (2007), Programování PLC podle normy IEC 61 131-3 v prostředí Mosaic [online]. [cit. 2012-11-15], [⟨http://www.tecomat.com/wpimages/other/DOCS/cze/TXV00321_01_Mosaic_ProgIEC_cz.pdf⟩](http://www.tecomat.com/wpimages/other/DOCS/cze/TXV00321_01_Mosaic_ProgIEC_cz.pdf).
- TECO A.S. (2009), Produkty – PLC Tecomat Foxtrot [online]. [cit. 2012-11-08], [⟨http://www.tecomat.com/kategorie-308-tecomat-foxtrot.html⟩](http://www.tecomat.com/kategorie-308-tecomat-foxtrot.html).
- TECO A.S. (2010), Začínáme v prostředí Mosaic [online]. [cit. 2012-11-15], [⟨http://www.tecomat.com/wpimages/other/DOCS/cze/TXV00321_01_Mosaic_ProgIEC_cz.pdf⟩](http://www.tecomat.com/wpimages/other/DOCS/cze/TXV00321_01_Mosaic_ProgIEC_cz.pdf).

- THE PHP GROUP (2001–2012), PHP: Hypertext Preprocessor [online]. [cit. 2012-12-04],
⟨<http://www.php.net/>⟩.
- TINTĚRA, L. (2005), title Denostupně - teorie k výpočetní pomůckce [online].
[cit. 2012-12-16],
⟨<http://www.tzb-info.cz/2592-denostupne-teorie-k-vypocetni-pomuccce>⟩.
- VALTER, J. (2010), *Regulace v praxi*, BEN. ⟨<http://valter.byl.cz/sites/default/files/ekviterm.pdf>⟩.
- WORKSWELL, S.R.O. (2011), Návrh automatického řízení inteligentního domu. Dokumentace k elektroprojektu.

Příloha A

Obsah přiloženého CD

K této práci je přiloženo CD, na kterém jsou uloženy zdrojové kódy.

- Adresář DP2012: vlastní diplomová práce ve formátu PDF
- Adresář matlab: zdrojové kódy návrhu regulátorů
- Adresář realizace: zdrojové kódy nasazených regulátorů a naměřená data

Příloha B

Zdrojové kódy

B.1 Funkční blok pro regulaci

```
FUNCTION_BLOCK OTOP_Kapilary_CVUTreg_Zima

VAR_INPUT
END_VAR
VAR_OUTPUT
END_VAR
VAR_IN_OUT
END_VAR
VAR
    venkovni_teplota : REAL;
    vnitrni_teplota : REAL;
    pozadovana_teplota : REAL;

    ekv_a : REAL;
    ekv_b : REAL;
    Kp : REAL;
    Ki : REAL;

    ekv_y : REAL;
    pi_y : REAL;
```

```

out          : REAL;

enable_ekv      : BOOL;
enable_pi       : BOOL;
reset_integral : BOOL;

odchylka : REAL;
integral : REAL;
pi_sat_h : REAL := 10.0;
pi_sat_d : REAL := -10.0;
windup_h : REAL := 10000.0;
windup_d : REAL := -10000.0;

sat_h      : REAL := 35.0;

timerTON: TON;
timerIN : BOOL;
timerQ  : BOOL;
timerPT : TIME := T#900s;

prvni_cyklus : BOOL := true;
END_VAR
VAR_TEMP
END_VAR

venkovni_teplota    := S25;
vnitrni_teplota     := T1_01;

IF cvutreg_all_to_default THEN

    cvutreg_ekv_a    := -0.45;
    cvutreg_ekv_b    := 27.55;
    cvutreg_Kp       := 3.5;
    cvutreg_Ki       := 0.000025;
    cvutreg_delta_t := 900.0;

```

```

cvutreg_ref      := 19.0;

cvutreg_enable_ekv      := false;
cvutreg_enable_pi       := false;
cvutreg_reset_integral := false;

reg_ventily_otevreny   := false;

integral := 0.0;

prvni_cyklus          := true;
cvutreg_all_to_default := false;
END_IF;

ekv_a     := cvutreg_ekv_a;
ekv_b     := cvutreg_ekv_b;
Kp        := cvutreg_Kp;
Ki        := cvutreg_Ki;

pozadovana_teplota := cvutreg_ref;

enable_ekv      := cvutreg_enable_ekv;
enable_pi       := cvutreg_enable_pi;
reset_integral := cvutreg_reset_integral;

IF reset_integral THEN
    integral := 0.0;
    reset_integral := false;
END_IF;

IF cvutreg_delta_t < 600.0
THEN cvutreg_delta_t := 600.0; END_IF;
IF cvutreg_delta_t > 21600.0
THEN cvutreg_delta_t := 21600.0; END_IF;

```

```

timerPT := REAL_TO_TIME(cvutreg_delta_t*1000.);

timerTON( IN := timerIN, PT :=timerPT, Q => timerQ );

IF timerIN = false THEN timerIN := true; END_IF;

IF timerQ OR prvni_cyklus THEN

(* EKVITERMA *)

ekv_y := ekv_a * venkovni_teplota + ekv_b;

(* PI REG. *)

IF enable_pi THEN

odchylka := pozadovana_teplota - vnitrni_teplota;
integral := integral + (odchylka*cvutreg_delta_t);

// anti-windup

IF integral > windup_h THEN integral := windup_h;
END_IF;
IF integral < windup_d THEN integral := windup_d;
END_IF;

pi_y := (Kp*odchylka) + (Ki*integral);

// saturace
IF pi_y > pi_sat_h THEN pi_y := pi_sat_h; END_IF;
IF pi_y < pi_sat_d THEN pi_y := pi_sat_d; END_IF;

END_IF; //END enable_pi

```

```

(* VYSTUP *)

out := 0.0;

IF enable_ekv THEN out := out + ekv_y; END_IF;
IF enable_pi THEN out := out + pi_y; END_IF;
IF out = 0.0 THEN out := sat_h; END_IF;
// vypnuto, default: topit naplno

IF out > sat_h THEN out := sat_h; END_IF;
// ochrana kapilar

t_do_kapilar_zima := out;

timerIN      := false;
prvni_cyklus := false;
END_IF;      // END timerQ

END_FUNCTION_BLOCK

```

B.2 PHP skript pro zpracování dat

```

<?php

class log {

    public $orig_file    = 'log.csv';
    public $improved_file = 'log_improved.csv';
    public $param_file   = 'ident_par.csv';
    public $matlab_file = 'ekviterma.csv';
    public $temp_file   = 'temp.csv';
    public $get        = array();

    function __construct() {

```

```
$this->get = $this->clean($_GET);
if(!isset($this->get['a'])) $this->get['a'] = null;
}

public function orig_to_improve() {

    $load = file_get_contents($this->orig_file);
    $pattern = '/(\d{2}.\d{2}.\d{4})/i';
    $replacement = '
$1';

    $save = preg_replace($pattern, $replacement, $load);
    $put = file_put_contents($this->improved_file, $save);

    if($put>0) $this->remove_first_datarow();
    else return null;

    return $this->linecount($this->improved_file);
}

public function remove_first_datarow() {

    $row=1;
    if (($handle = fopen($this->improved_file, "r")) !== FALSE)
    {
        $handle2 = fopen($this->temp_file, "w");

        while (($data = fgetcsv($handle, 1000, ";")) !== FALSE) {
            if ($row != 2) {
                fputcsv($handle2, $data, ";");
            }
            $row++;
        }
        fclose($handle); fclose($handle2);
    }
}
```

```

unlink($this->improved_file);
rename($this->temp_file,$this->improved_file);
}

}

public function my_own_format($head=true) {

$mod=1;

if (($handle = fopen($this->improved_file, "r")) !== FALSE)
{
    $handle3 = fopen($this->temp_file, "w");

    if($head == true) {
        $handle2 = fopen($this->param_file, "r");
        while (($data = fgetcsv($handle2, 2000, ";")) !== FALSE)
        {
            fputcsv($handle3,$this->get_subdata($data),";");
            break;
        }
        fclose($handle2);
    }

    while (($data = fgetcsv($handle, 1000, ";")) !== FALSE) {
        if((int)substr($data[0],0,2) > 23 || (int)substr($data[0],3,2) == 12 ){
            // substr($data[0],3,2) ... mesic
            // substr($data[0],0,2) ... den

            //if($mod%15 == 1) {           // po 15 minutách
                fputcsv($handle3, $this->get_subdata($data),";");
                // $mod=1;
            //}
            //$mod++;
        }
    }
}

```

```
}

fclose($handle); fclose($handle3);

rename($this->temp_file,$this->matlab_file);
}

return $this->linecount($this->matlab_file);
}

private function get_subdata($data) {
    if(is_array($data))
        // identifikace viz ident_par.csv
        return array($data[0],$data[1],$data[16],$data[17],$data
            [5],$data[62],$data[63]);
    else
        return null;
}

public function linecount($file) {
    return count(file($file));
}

public function csvdump($file, $line=1) {

    $row = 1;
    if (($handle = fopen($file, "r")) !== FALSE) {
        while (($data = fgetcsv($handle, 2000, ";")) !== FALSE) {
            if($row == $line) {
                $dump = 'Identifikace hlaviček<br/><ul>';
                foreach($data as $key => $val) { $dump .= '<li>[' .
                    $key . '] => ' . $val . '</li>;' }

                $dump .= '</ul>';
            }
        }
    }
}
```

```
        break;
    }
    $row++;
}
fclose($handle);
}

if(isset($dump)) return $dump;
else return null;
}

public function clean($elem) {

    if(!is_array($elem))
        $elem = htmlentities($elem, ENT_QUOTES, "UTF-8");
    else
        foreach ($elem as $key => $value)
            $elem[$key] = $this->clean($value);
    return $elem;
}
}

$log = new log;

switch ($log->get['a']):
    case 'orig_to_improve':
        $result = "Zpracování originálního souboru, nový " .
        $log->improved_file . ": ";
        $result .= $log->orig_to_improve();
        break;
    case 'my_own_format':
        $result = "Vytvoření CSV pro Matlab, počet řádků " .
        $log->matlab_file . ": ";
        $result .= $log->my_own_format();
        break;
}
```

```
case 'dump_ident':
    $result = $log->csvdump($log->param_file);
    break;
default:
    $result = 'Graf vygenerovat Matlabem.<br/>
';
endswitch;

?>

<!DOCTYPE html PUBLIC "-//W3C//DTD XHTML 1.0 Strict//EN"
"http://www.w3.org/TR/xhtml1/DTD/xhtml1-strict.dtd">
<html xmlns="http://www.w3.org/1999/xhtml" xml:lang="en" lang="en">

<head>
    <title>Nástroj pro zpracování dat z domu Bečan</title>
    <meta http-equiv="content-type" content="text/html; charset=
utf-8" />
    <meta name="generator" content="Geany 0.21" />
</head>
<body>

    <p>&nbsp;</p>
    <p><strong><a href="loader.php">INDEX</a></strong> |
        <a href="?a=orig_to_improve">Zpracování originálního
        souboru </a> |
        <a href="?a=my_own_format">Vytvoření CSV pro Matlab</a> |
        <a href="?a=dump_ident">Identifikace hlaviček</a> |
    <p>&nbsp;</p>
    <p>Výsledek akce: <?php echo $result; ?></p>

</body></html>
```