ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ŘÍDICÍ TECHNIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Analýza vytápění rodinného domu

Family House Heating Analysis

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Ferkl, Ph.D.

Jakub Jiříček

Praha 2010

Prohlášení

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

V Praze dne _____ _____

podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval všem, kteří mi pomáhali při psaní této práce. Děkuji zejména vedoucímu práce, Lukášovi Ferklovi, a Ondřejovi Nývltovi za jejich pomoc a užitečné rady. V neposlední řadě děkuji rodině za to, že mě podporovala a umožnila mi studium na vysoké škole.

Abstrakt

Tato práce se zabývá regulací vytápění budov. Jejím cílem je navrhnout zlepšení řídicího systému, který vytápí rodinný dům. Hlavní částí je analýza dat z předchozí topné sezóny. Tato data obsahují údaje týkající se vytápění domu. Na základě této analýzy byl upraven původní program tak, aby se dosáhlo hospodárnějšího provozu. Takto upravený program byl uveden do provozu a částečně otestován.

Abstract

This thesis deals with regulation of heating in buildings. Its purpose is to propose an improvement of a system, which controls heating of a family house. The main part of the thesis is an analysis of the data from last year's heating period. The data contain information about the heating of the house. On the basis of this analysis, an original program has been modified in order to reduce losses. The modified version has been put into practice and partially tested.

Obsah

Kapitola 1 Úvod 1

Kapitola 2 Vytápění 2
- **2.1. Vytápění budovy** 2
- **2.2. Tepelné ztráty** 2
- **2.3. Výroba a rozvod tepla** 3
  - **2.3.1. Šíření tepla** 3
  - **2.3.2. Teplovodní vytápění** 4
- **2.4. Regulace** 6
  - **2.4.1 Termostat** 6
  - **2.4.2. Ekvitermní regulace** 6
  - **2.4.3. PID** 7
  - **2.4.4. MPC** 7
  - **2.4.5. IRC** 7

Kapitola 3 Popis domu a jeho technického vybavení 8
- **3.1. Popis domu** 8
- **3.2. Popis technického vybavení** 9
  - **3.2.1. Kotel a jeho vybavení** 9
  - **3.2.2. Termoelektrická hlavice** 11
  - **3.2.3. Řídicí systém** 11

Kapitola 4 Analýza systému a návrh řešení 13
- **4.1. Možnosti regulace** 13
- **4.2. Stávající regulace – PID** 13
  - **4.2.1. Porovnání referenčních teplot se skutečnými** 13
  - **4.2.2. Vliv venkovní teploty** 16
  - **4.2.3. Akční zásah** 19
  - **4.2.4. Hospodárnost stávající regulace** 19
- **4.3. Ekvitermní regulace** 20
  - **4.3.1. Otopná křivka** 20
  - **4.3.2. Průběh teplé vody za kotlem** 21
- **4.4. MPC** 21
- **4.5. Návrh řešení** 23
  - **4.5.1. Popis nového řešení** 23
  - **4.5.2. Filtrace** 23
  - **4.5.3. Zapojení regulátoru v soustavě** 23
  - **4.5.4. Porovnání různých regulací** 24

Kapitola 5 Výsledky 29

Kapitola 6 Závěr 35

Reference 36

Ostatní literatura 36

Obsah CD 37

Kapitola 1

Úvod

Již od objevení ohně se lidé zabývali tím, jak dosáhnout pohodlnějšího bydlení. Díky velkému vývoji ve stavebnictví jsme se dostali z jeskyně do obydlí našich dnů. Nyní jsme již schopni dosáhnout teplotně příjemného prostředí v našich bytech a domech. Dnes již tedy není hlavní otázkou dosáhnout tepelné pohody, ale dosáhnout jí při nejnižší možné spotřebě energie. K tomuto nás vede zejména zdražování energií a snaha o ohleduplnější chování vůči přírodě. V této práci se nebudeme zabývat vlivem stavebních úprav, které by pomohly snížit energickou náročnost budovy. Nebudeme zasahovat do budovy tím způsobem, že bychom ji opatřili izolací nebo novými okny. Pokusíme se ale najít vhodnou regulaci, která by měla zajistit hospodárnější vytápění daného objektu.

Tato bakalářská práce je rozdělena do tří částí. Nejprve se seznámíme s vytápěním budovy, zde rodinného domu. Vyjmenujeme hlavní druhy vytápěcích systémů. Vysvětlíme jejich princip a uvedeme některé příklady. Uvedeme různé typy regulačních systémů.

Ve druhé části se zaměříme na konkrétní objekt. Jedná se o rodinný dům, který je obývaný čtyřčlennou rodinnou. Popíšeme jeho technické vybavení a stávající způsob regulace topení. Nastíníme možnosti regulace. Na základě dat z předchozí topné sezóny provedeme analýzu a navrhneme zlepšení stávajícího stavu. Postupně vezmeme v úvahu možné způsoby regulace a vybereme ten nejvhodnější.

Ve třetí části implementujeme upravený program a nasadíme ho do provozu. Naměřená data porovnáme s předchozím stavem. Na závěr okomentujeme výsledky z energetického hlediska.

Kapitola 2

Vytápění

2.1. Vytápění budovy

Vytápění je systém, který má zajistit tepelnou pohodu v budově. V našich zeměpisných šířkách se v zimních měsících venkovní teplota dostane k takovým hodnotám, že je nutné budovu vytápět. Dobře nastavený systém by měl kompenzovat tepelné ztráty způsobené únikem tepla do okolního studeného prostředí. V ideálním případě je budova dokonale tepelně izolována, ale taková budova neexistuje. K tomuto případu se můžeme více či méně blížit. Vytápění dnes patří ke standardnímu vybavení obytných zařízení.

Naší snahou je dosáhnout stavu, kdy se dodané teplo rovná tepelným ztrátám, aby nedocházelo ani k přetápění, ani k pocitu zimy. Toto shrnuje následující rovnice, kde Q je teplo, Q_{in} je teplo dodané topením a Q_{out} jsou ztráty. Rozdíl ΔQ by měl být nulový.

$$\Delta Q = Q_{in} - Q_{out}$$

2.2. Tepelné ztráty

Jak jsem již naznačil výše, při návrhu vytápěcího zařízení musíme vzít v úvahu tepelné ztráty. Nejprve budeme jmenovat ty ztráty, které regulací neovlivníme.

Jednou z jejich příčin je větrání. V obytných prostorech je třeba splnit požadavek intenzity výměny vzduchu $n = 0{,}5\ \mathrm{h}^{-1}$, kde n je součinitel výměny vzduchu. Ten vypočítáme touto rovnicí

$$n = \frac{3600 \sum (il) BM}{V},$$

kde i je součinitel provzdušnosti [$\mathrm{m}^3\ \mathrm{m}^{-1}\ \mathrm{Pa}^{-0{,}67}$], l je délka spár otevíratelných částí oken a venkovních dveří [m], B je charakteristické číslo budovy [$\mathrm{Pa}^{0{,}67}$], M charakteristické číslo místnosti [-] a V je objem místnosti [m^3]. **[1]** Součinitel výměny vzduchu je poměr objemu výměnného vzduchu k objemu celého prostoru v místnosti.

Na osobu bychom měli počítat s množstvím vyměněného vzduchu 15 až 30 $\mathrm{m}^3.\mathrm{h}^{-1}$. V době, kdy v domě nikdo není, by měl být součinitel výměny vzduchu $n = 0{,}1\ \mathrm{h}^{-1}$ kvůli odvodu vlhkosti a případných škodlivin (např. těkavé látky uvolňující se z nábytku).**[2]**

Další ze ztrát nesouvisející přímo s výrobou tepelné energie je ztráta prostupem tepla zdmi budovy. Tato ztráta závisí na světové straně zdi, součiniteli prostupnosti a schopnosti zdi akumulovat teplo.

Oba dva druhy ztrát přímo souvisí s technickým stavem budovy a se zeměpisnými a klimatickými podmínkami místa.

Nyní uvedeme ztráty, které regulací ovlivnit můžeme.

Kotel, zařízení na výrobu tepla, pracuje s určitou účinností. Například výrobce Viadrus uvádí pro typ Hercules U 26 účinnost 80 % při teplotě výstupní kotlové vody 60 °C až 85 °C. Vhodnou regulací docílíme nejúčinnějšího režimu kotle tím, že určitý objem vody natopíme na tuto teplotu. Podle potřeby mísíme teplou vodu se studenou v otopném oběhu. Je to výhodnější něž natápět veškerý objem na nižší teplotu.

Další zdrojem ztrát je zbytečné přetápění budovy, které pak vede k větrání, tedy k maření energie bez žádného užitku. Toto by měla správně navržená regulace vyloučit nebo výrazně omezit. Protože se zabýváme ústředním vytápěním, nebudeme brát v potaz ztráty způsobené rozvodem a dopravou tepla.

2.3. Výroba a rozvod tepla

2.3.1. Šíření tepla

Teplo se šíří třemi základními způsoby. Jsou to vedení, proudění a sálání. V literatuře se často používají také termíny kondukce, konvekce a radiace.

Šíření tepla vedením je způsob šíření tepla mezi tuhými tělesy o odlišné teplotě. Přenos tepla se uskutečňuje mezi stýkajícími se částmi. Tento typ přenosu tepla nalezneme například při předávání tepla mezi zdmi a příčkami budovy.

Šíření tepla prouděním je způsob přenášení tepla proudící tekutinou (tj. kapalinou nebo plynem) z místa o vyšší teplotě do místa o teplotě nižší proti směru teplotního gradientu. Šíření tepla konvekcí mezi povrchem tuhého tělesa a tekutinou a naopak se nazývá též přestup tepla. Za prostup tepla považujeme výměnu tepla mezi dvěma tekutinami, plyny nebo kapalinami oddělenými tuhou stěnou. Prostup tepla se tedy skládá z přestupu tepla, vedení tepla a opět přestupu tepla.

Tepelné sálaní (tepelné záření, termální radiace) je přeměna tepelné energie v zářivou a předávání (emise) zářivé energie do prostoru obklopující těleso. Opětnou přeměnu zářivé energie, dopadající na těleso, v energii tepelnou nazýváme pohlcování (termální absorpce). Vzájemné vyzařování a pohlcování zářivé energie mezi dvěma nebo více tělesy nazýváme sdílením tepla sáláním. **[1]**

Vytápěcí zařízení můžeme rozdělit podle způsobu šíření tepla na sálavé a proudivé. Možné jsou i kombinace obou. Tepelné infračervené zářiče jsou zástupci sálavého šíření.

Obrázek 2.1: Příklad zářiče ROTT GobiOH 2028 o výkonu 2 kW [3]

Proudivé systémy lze dále rozdělit podle typu teplonosného média. Existuje vytápění řešené vzduchotechnikou a klasické teplovodní.

Teplovzdušné vytápění má výhodu oproti teplovodnímu v rychlosti a pružnosti. Odpadá také potřeba radiátorů. Je však třeba počítat se vzduchovody. Tento způsob vytápění zároveň zajišťuje ventilaci. Ve vzduchotechnice je v ČR povinné používat rekuperační jednotku, která využije teplo odcházejícího vzduchu. Dnes často využívaná klimatizace umožňuje mimo vytápění i naopak chlazení obývaných prostor.

Teplovodní vytápění je dnes pravděpodobně nejpoužívanější způsob. I v našem konkrétním případě je tomu tak. Proto se budeme dále zabývat běžným teplovodním vytápěním.

2.3.2. Teplovodní vytápění

Topné médium, většinou voda, se v kotli natopí a poté obíhá v tepelné soustavě trubek a radiátorů. Zde vychládá a je poté znovu ohřívána. Takto se celý cyklus opakuje.

Dříve se používaly systémy s přirozeným oběhem. Ten využívá fyzikálního jevu, že se teplá nahřátá voda tlačí nahoru a studenější vychládající voda je tlačena zpátečním potrubím do kotle. U těchto topných soustav se používají širší trubky o průměru 2“[1] od kotle. Dále se trubky zužují podle toho, jak jsou jednotlivé radiátory daleko od kotle. Ty nejbližší měly nejslabší trubku 3/8“, protože oběhový odpor je zde nejmenší. Naopak ty nejvzdálenější radiátory mají přívodní trubku o průměru 1“.

V dnešní době se prosazuje nucený oběh, který je zajišťován čerpadlem. Jeho výhodou je rychlejší šíření tepla spolu s lepší řiditelností. Umožňuje použít menší objem vody, což v důsledku přináší větší účinnost.

Dalším rozdělením teplovodního vytápění může být typ použitého paliva. Existují kotle na tuhá paliva jako je dřevo, uhlí, na LTO, plynové a elektrické kotle. Existují i kombinace uvedených typů se solárním ohřevem nebo jiným způsobem. Používají se i tepelná čerpadla, která využívají geotermální energii. Druh paliva má vliv na regulaci vytápěcího systému. Například plynové a elektrické zdroje jsou pružnější a lze je snáze regulovat než kotle na tuhá paliva.

Některé systémy obstarávají i výrobu TUV. V otopné soustavě je umístěn tepelný výměník, který ohřívá vodu v zásobníku nebo boileru. Jako vhodná kombinace se jeví v zimních měsících ohřívat užitkovou vodu kotlem a solárními panely v létě. V případě takového počasí, kdy není nutno topit, ale zároveň je malý výkon solárních panelů, je možno ohřát vodu pomocí tepelného tělesa v bojleru. Další možností výroby TUV je průtokové ohřívání. TUV se neskladuje, je vyráběna tehdy, kdy je jí potřeba. Průtokový ohřívač by tedy měl být dostatečně dimenzovaný na požadovaný odběr (např. při sprchování).

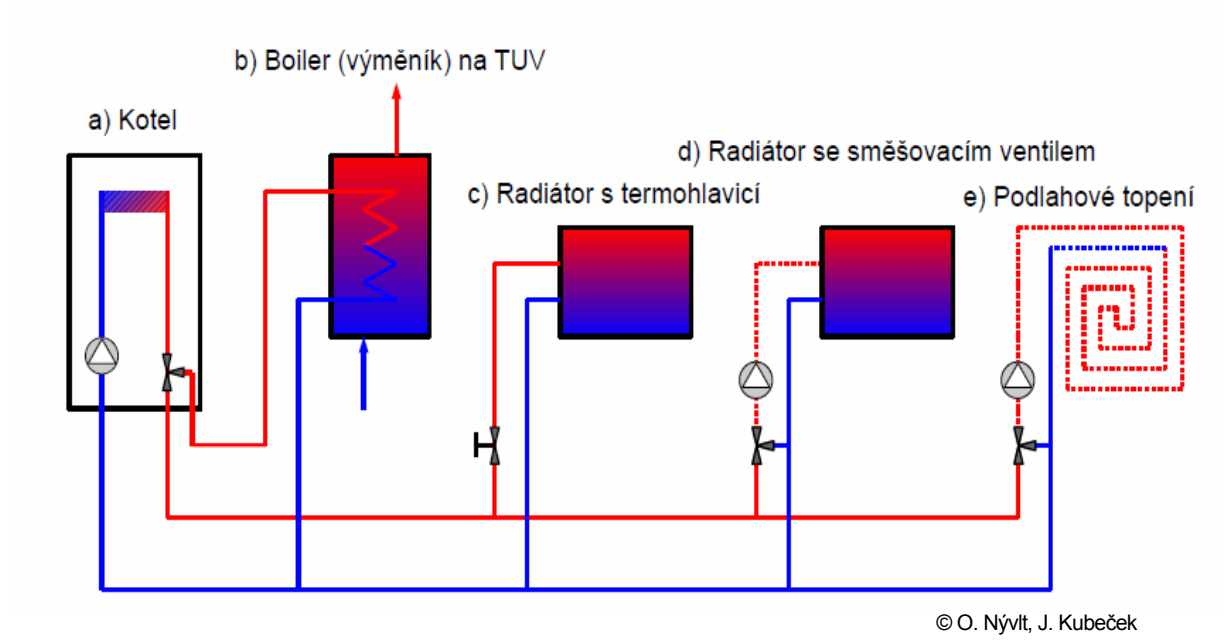
Zajímavým prvkem ve vytápěním jsou tzv. TABS (Thermally Activated Building Systems). Jsou známy hlavně jako podlahové vytápění. Používají se ale i stropní a stěnová topení. V budovách, ve kterých se používá jen tento přístup, odpadává nutnost instalace radiátorů. Nevýhodou je nutnost nižší teploty teplonosného média (27 °C) než při použití radiátorů. V případě kombinace obou se to řeší tak, že podlahové vytápění je napájeno vodou z vratné vody, která již stihla částečně vychladnout.

Dále můžeme uvést systémy se zásobníky. Topnou vodu můžeme natopit na několik dní dopředu do zásobníku, který by měl být dobře izolovaný. Oproti systémům bez zásobníku můžeme vodu v zásobníku ohřát v kombinaci s jiným zdrojem, proto se zásobníky používají s alternativními zdroji energie jako jsou například tepelná čerpadla. Teplou vodu ze zásobníku postupně odebíráme a mísíme se studenou vodou podle potřeby. Takto lze velice plynule regulovat.

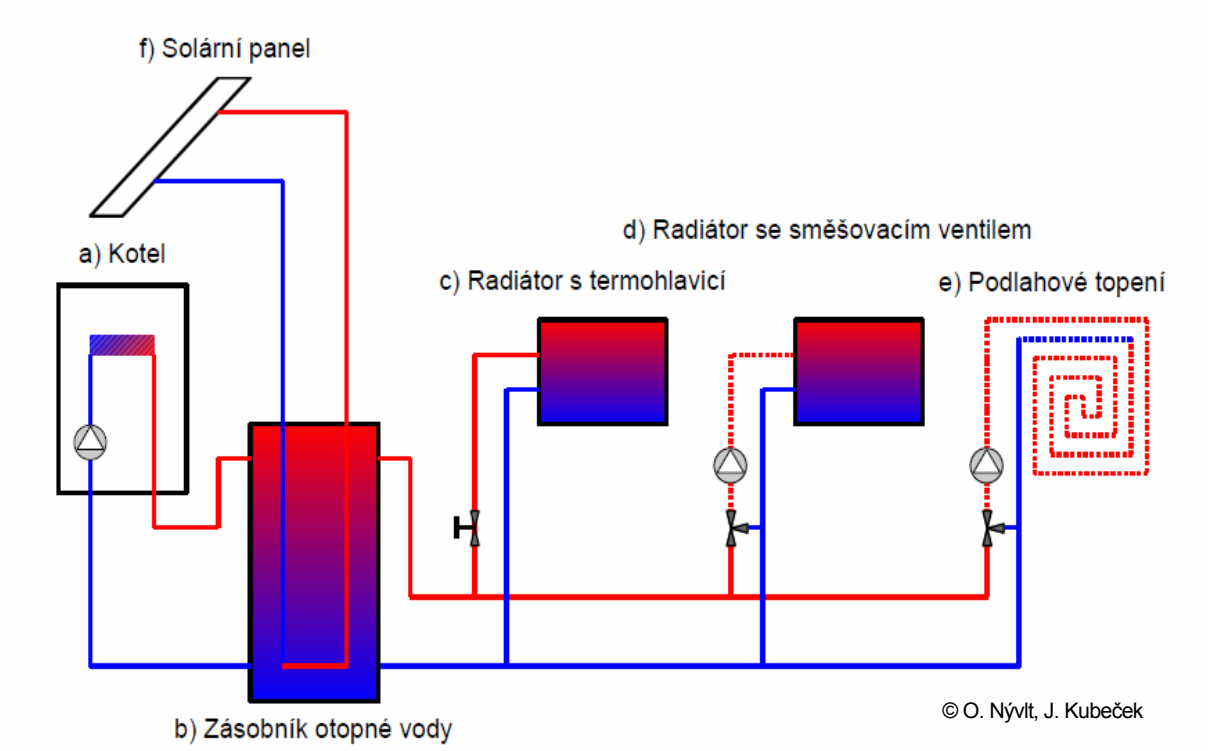
[1] 1” (palec, coul) = 25,4 mm

Dnes se u radiátorů často používají termohlavice. Ty jsou nastaveny na určitou teplotu, při níž omezují průtok teplé vody. Důvodem je snaha zbytečně nepřetápět místnost. Jiným způsobem řešení tohoto problému jsou směšovací ventil u radiátoru, servohlavice nebo termoelektrická hlavice.

Na následujících obrázcích si ukážeme kombinaci uvedených prvků.



Obrázek 2.2: Příklad vytápěcího systému s ohřevem TUV pomocí bojleru [4]



Obrázek 2.3: Příklad vytápěcího systému se zásobníkem otopné vody a solárním panelem [4]

2.4. Regulace

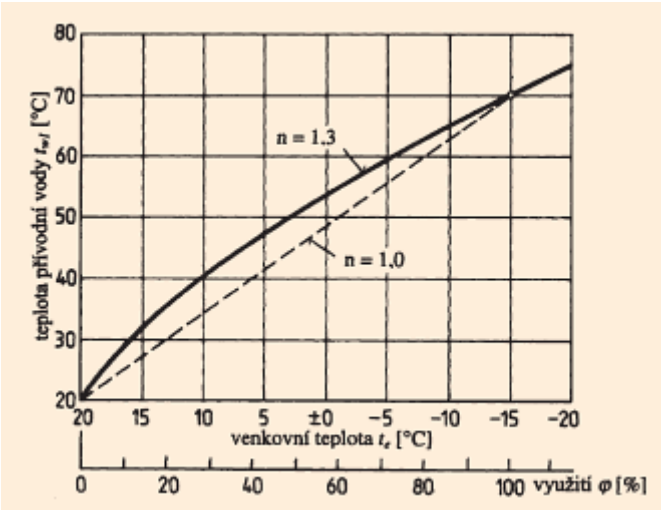
Návrh regulace závisí na typu vytápěcího zařízení. Některé systémy nám dovolují plynulou regulaci, některé nabízejí jen termostatické řízení. Tepelný výkon můžeme regulovat u zdroje tepla nebo naopak u spotřebiče. Teplota vstupní vody do otopné soustavy může být regulována přímo (u kotle) nebo nepřímo (směšováním) a místně (např. termostatickým ventilem u radiátoru). Teplovodní soustavu lze regulovat dvěma základními způsoby. Kvalitativní regulace přivádí do otopné soustavy konstantní objem vody o proměnné teplotě. U kvantitativní regulace je to přesně naopak. Existují i sdružené systémy, které kombinují oba přístupy. **[5]**

2.4.1 Termostat

Nejednoduší regulací je spínání kotle termostatem. Jedná se v podstatě o hysterezi. Vstupem je teplotní čidlo umístěné například do referenční místnosti. Pod nastavenou teplotou termostat aktivuje kotel, který začne topit. Teplota, která kotel vypne, bude o trochu větší, aby se kotel neustále nevypínal a nezapínal.

2.4.2. Ekvitermní regulace

Ekvitermní regulace reaguje na venkovní teplotu. Je daná určitá závislost mezi venkovní teplotou a teplotou výstupní kotlové vody. Čím je nižší venkovní teplota, tím větší potřebujeme výkon na vytopení budovy. Tuto proporcionalitu určuje otopná křivka, někdy popisovaná jako ekvitermní.



Obrázek 2.4: Příklad ekvitermní křivky [5]

Obrázek **2.4** popisuje zmíněnou závislost. Je logické, že pro vyšší teploty je nutné dodat vetší tepelný výkon, tedy i vyšší teplotu otopné vody. Konkrétní tvar otopné křivky závisí na daném objektu.

Existuje i tzv. adaptivní ekvitermní křivka. Nejdříve se nastaví základní model. Na základě naměřených dat z minulosti se křivka upraví. Takto vybavený systém je tedy schopen sám sebe postupně vylaďovat.**[4]**

2.4.3. PID

Dobře nastavená PID regulace zajišťuje stabilní chování systému, hladký průběh akčních zásahů a dosáhnutí referenční hodnoty. Podmiňuje to ovšem správné nastavení konstant. Ty určují i dynamické parametry regulace. I nelineárních systémů se musí provést linearizace a regulaci nastavit pro pracovní bod.

2.4.4. MPC

MPC je anglická zkratka Model Predictive Control. Základem této metody je namodelovat tepelné chování budovy. Tento model zahrnuje tepelné dynamické a akumulační vlastnosti budovy. Umožní předpovědět vývoj teploty v místnostech na základě předpovědi počasí. Jestliže je model dostatečně přesný, tento typ regulace dokáže optimálně řídit teploty v jednotlivých místnostech (IRC). Jeho nevýhodou je velká výpočetní náročnost a nutnost přesného modelu. Aplikací a využitím v praxi MPC se zabývá vedoucí této práce se svým týmem, pan Ing. Lukáš Ferkl, Ph.D.

2.4.5. IRC

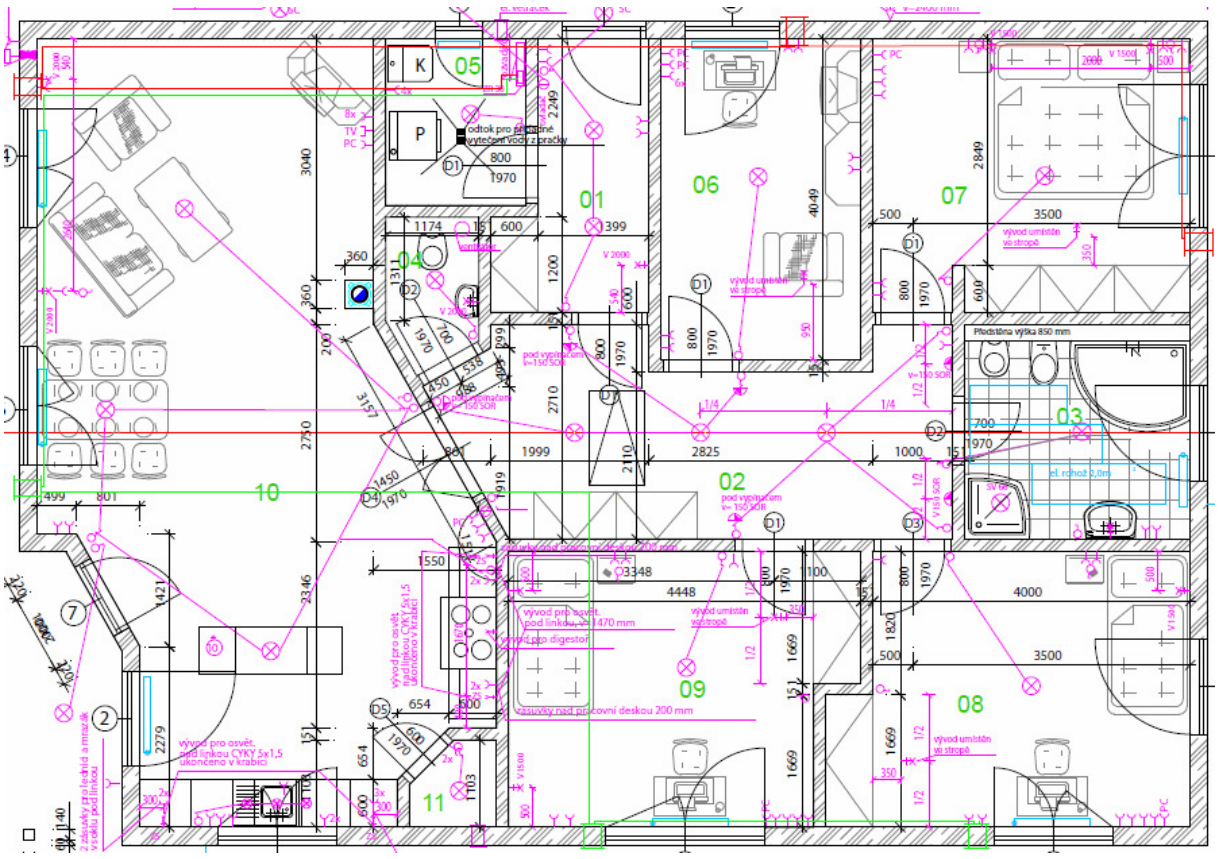
Individual Room Control dokáže regulovat teploty v jednotlivých místnostech nezávisle na sobě. Realizací tohoto druhy regulace může být například použití termoelektrických hlavic u radiátoru, které se přivírají nebo otevírají v závislosti na teplotě v místnosti. Další možností je nastavení ekvitermní křivky pro každou větev otopné soustavy zvlášť.

Kapitola 3

Popis domu a jeho technického vybavení

3.1. Popis domu

V této kapitole se budu zabývat regulací rodinného domu obývaného čtyřčlennou rodinou. Vytápěné prostory se nacházejí v jediném patře. Místnosti 1 a 2 jsou používané jako chodby. Teploty v těchto místnostech tedy nemusejí být tak vytopené jako obývané místnosti. Místnosti 3 a 6 se využívají jako koupelna, respektive jako pracovna. Místnost 7 je ložnice. Dětské pokoje jsou zakresleny na půdorysu pod čísly 8 a 9. Poslední místnost, kde je umístěno čidlo a ze které máme k dispozici data, je obývací pokoj spojený s kuchyní, místností 10. Z následujícího půdorysu je patrné rozložení místností v budově.



Obrázek 3.1: Půdorys vytápěného patra

Tabulka 3.1: Poloha místností vůči světovým stranám

Číslo místnosti	Název místnosti	Světová strana
1	vstupní chodba	sever
2	hala	-
3	koupelna	východ
6	pracovna	sever
7	ložnice	severovýchod
8	dětský pokoj 1	jihovýchod
9	dětský pokoj 2	jih
10	obývák + kuchyně	jihozápad

Vliv světových stran není zanedbatelný. Dětské pokoje spolu s obývacím pokojem budu významněji ovlivňovány slunečním svitem. Lze tedy očekávat, že v těchto místnostech budou naměřené teploty větší. Je to dáno tím, že na severní polokouli slunce svítí většinu dne jižním směrem. Z tohoto důvodu snímáme vnější teplotu severní i jižní.

3.2. Popis technického vybavení

Dům je vybaven elektrickým kotlem, elektronicky řízenými radiátory a řídicím systémem. Kromě vytápění objektu je výkon kotle využit i na výrobu teplé užitkové vody. Ve výše uvedených místnostech jsou umístěny teplotní senzory a radiátory. Ty jsou osazeny termoelektrickou hlavicí, kterou je možno řídit vstupním signálem. Detailnější popis zařízení je k nalezení v příloze. Zde se omezím na stručnější popis.

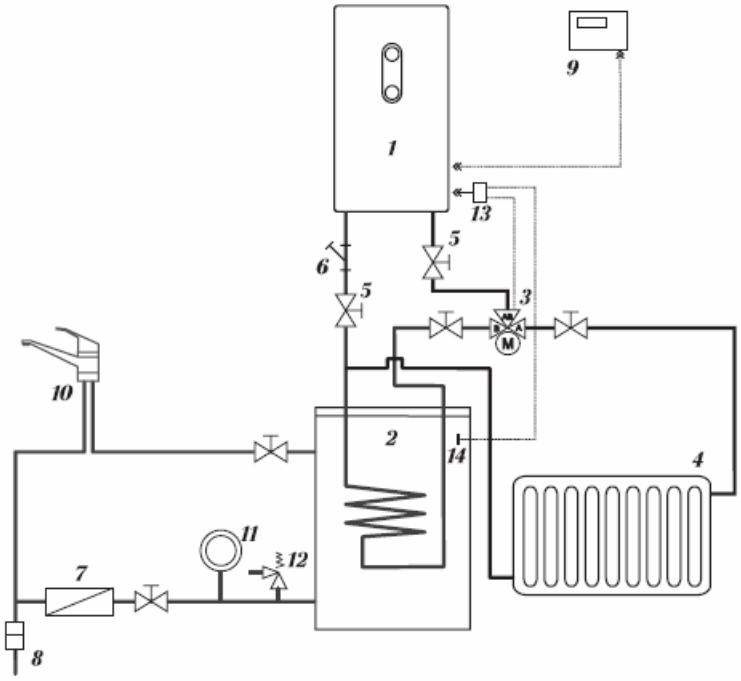
Mimo tyto součásti se do vytápění domu také zapojují kamna v obývacím pokoji. Na jejich chod regulátor samozřejmě nemá vliv. Nelze ani detekovat, kdy se používají. Z toho důvodu kamna vstupují do regulované soustavy jako porucha. Kamna tedy vystupují jako faktor, který „občas“ významně ovlivňuje teplotu v místnosti. Podobným případem jsou vyhřívaný žebřík s rohoží v koupelně. Žebřík je blízko čidla, ovlivňuje tak správnost údaje. Naopak rohož téměř nemá vliv z důvodu malého výkonu. Chod obou těchto těles jsme schopni detekovat.

3.2.1. Kotel a jeho vybavení

Jedná se elektrický kotel REJNOK 12 kW od výrobce Protherm. Tento kotel napájíme 3 fázově 400 V o kmitočtu 50 Hz. Maximální provozní teplota otopné vody je 85 °C. Kotel je spínán elektronicky termostatem. V našem případě signál termostatu nahradíme signálem z řídicího systému, což nám umožní mít provoz kotle více pod kontrolou. Může nastat situace, kdy je na vstup kotle vyslán požadavek „topit“, který bude ignorován. Je to dáno z toho důvodu, že je kotel vybaven vnitřním ochranným termostatem. Jestliže rozhodne, že teplota otopné vody je příliš vysoká, nedovolí topit. Po vypnutí topných těles je čerpadlo, které zajišťuje nucený oběh, v provozu ještě další 4 minuty. Takto je kotel nastaven přímo od výrobce. Jestliže zvláštní povaha topné soustavy vyžaduje delší běh čerpadla, lze nastavit 12 nebo 20 minut. Možné je i takové nastavení, kdy se čerpadlo nevypíná vůbec.**[6]**

Obrázek 3.2: Kotel Protherm Rejnok 12kW [6]

Následující schéma nám ukazuje, jak je kotel zapojen do otopné soustavy.



Informativní schéma zapojení elektrokotle s nepřímoohřívaným zásobníkem

1. elektrokotel
2. zásobník
3. trojcestný motoricky řízený ventil
4. systém vytápění
5. uzavírací ventil
6. filtr
7. zpětná klapka
8. úpravna užitkové vody
9. pokojový regulátor
10. odběrné místo
11. expanzní nádoba
12. pojišťovací ventil
13. spínací relé a přídavné svorkovnice
14. termostat. čidlo

© Protherm

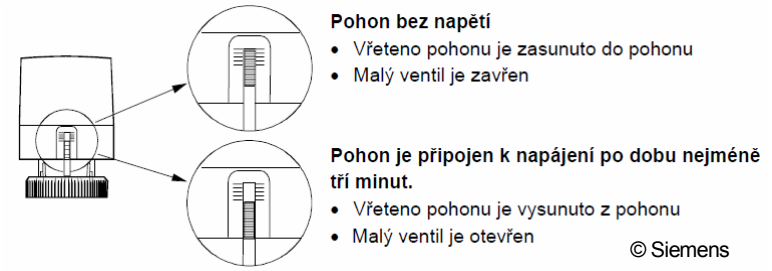
Obrázek 3.3: Schéma zapojení kotle do soustavy [7]

Jak je patrno z obrázku **3.3**, kotel zajišťuje ohřev TUV. V zásobníku je přes tepelný výměník ohřívána užitková voda. Trojcestný ventil řídí tok teplé vody do zásobníku a do radiátorů. Může nastat situace, kdy bude odběr užitkové vody tak velký, že bude třeba přerušit vytápění budovy a využít výkon kotle pro výrobu TUV. Kotel má tedy vnitřní řídicí logiku, která rozhoduje zda topit či ohřívat vodu. **[7]**

3.2.2. Termoelektrická hlavice

Obrázek 3.4: Termoelektrická hlavice Siemens STP 71 [8]

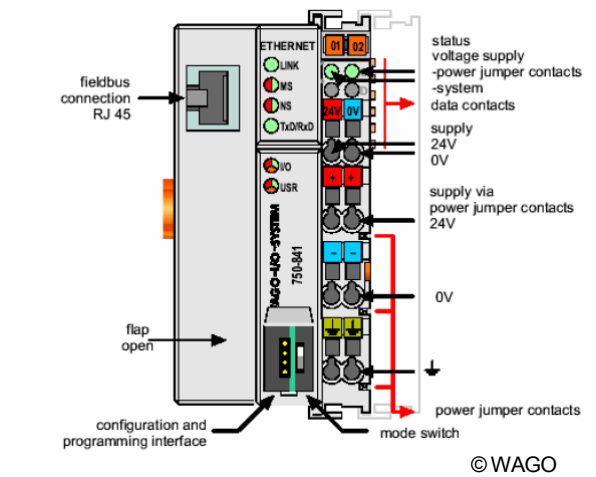
V domě se používá elektricky řízený ventil značky Siemens STP 71, který se používá k regulaci koncových zařízení v tepelné i chladící technice. Po připojení ovládacího napětí na pohon stoupá teplota topného tělíska a způsobuje rozpínání tuhého média. Toto rozpínání je převedeno na lineární pohyb. Vřeteno pohonu se vysouvá a ventil otevírá. Po odpojení pohonu od napájení se vřeteno pohonu zasouvá a ventil je uzavřen silou pružiny ventilu. **[8]**



Obrázek 3.5: Princip chodu termoelektrické hlavice [8]

3.2.3. Řídicí systém

O chod vytápění budovy se stará řídicí systém od výrobce Wago. Jedná se o modulární systém WAGO I/O řady 750-841. Přes ethernet je spojen se serverem, kam se ukládají naměřená data. Umožňuje pohodlné nastavení teplot v jednotlivých místnostech (IRC) přes vizualizaci. Je to centralizovaný systém, který dále ovládá ventilaci, osvětlení a žaluzie. Senzory i akční členy (hlavice, žárovky …) jsou spojeny se řídicí jednotkou jednotlivě, nikoliv přes sběrnici. Tento systém je možno do budoucnosti rozšířit i o okenní kontakty, které by zamezily zbytečnému plýtvání v případě, že se topí s otevřenými okny.



Obrázek 3.6: Řídicí systém 10/100 MBit ETHERNET fieldbus controller 750-841 [9]

Systém je vybaven následujícími Wago I/O kartami:

Tabulka 3.2: I/O karty řídicího systému

Označení karty	I/O	popis	poznámka	ks
750-430	I	8x digitální vstup 24V	-	20
750-530	O	8x digitální výstup 24V	-	17
750-530	O	8x digitální výstup 24V	inverzní logika	13
750-460/000-0003	I	analogová	vstup pro PT1000	4

Kapitola 4

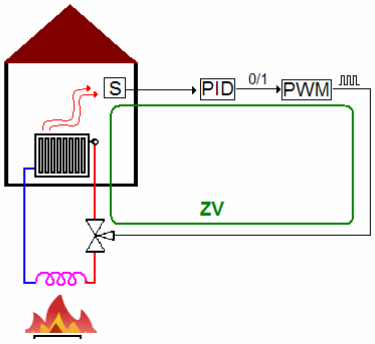
Analýza systému a návrh řešení

4.1. Možnosti regulace

V této kapitole se budu zabývat analýzou dat z minulosti. Na jejich základě určím nejvhodnější možnou regulaci. Pro náš studovaný dům existují tři možnosti regulace. Používán byl doposud PID regulátor. Porovnáme výsledky jeho regulace a zamyslíme se, zda-li nebylo vhodnější využít ekvitermní křivku nebo termostat. MPC zde použít nelze z důvodu nedostatečného výpočetního výkonu řídicího systému. Kdybychom přesto disponovali výkonnější jednotkou, instalace tahového systému by byla složitá a bylo by nutno předělat otopnou soustavu.

4.2. Stávající regulace – PID

K dispozici jsem dostal data z rodinného domu čtyřčlenné rodiny. Tato data byla zaznamenána v období mezi 22. 2. 2009 a 17. 6. 2009. Dovolí nám rozhodnout o tom, zda bylo použití PID regulátoru vhodné. Je to záznam průběhů teplot v místnostech a venkovního prostředí. Dále obsahují informace, kdy byl používán elektrický žebřík a rohož. Jsou k dispozici i data, která měla indikovat otevření jednotlivých hlavic v místnostech. Hodnoty byly odebírány jednou za 3 minuty. Data byla dodána v souboru xls. Aby mohla být zpracována a analyzována, byla importována do programu Matlab.

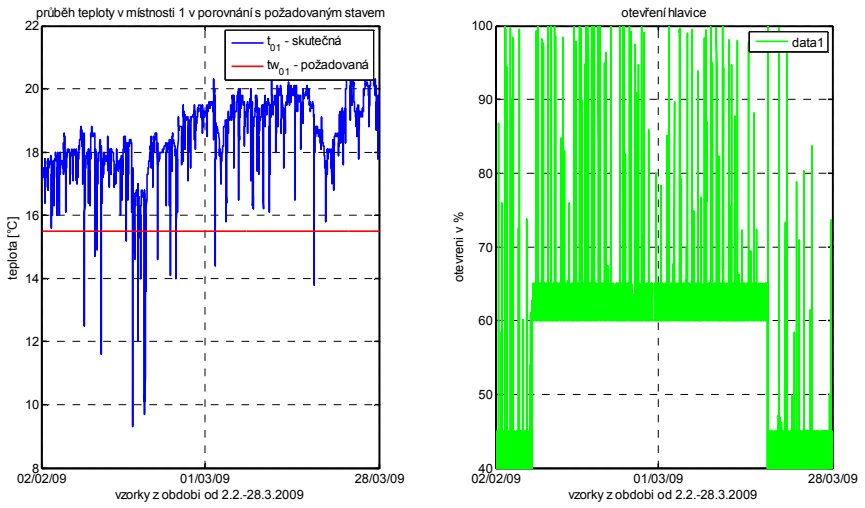


Obrázek 4.1: Schéma regulátoru

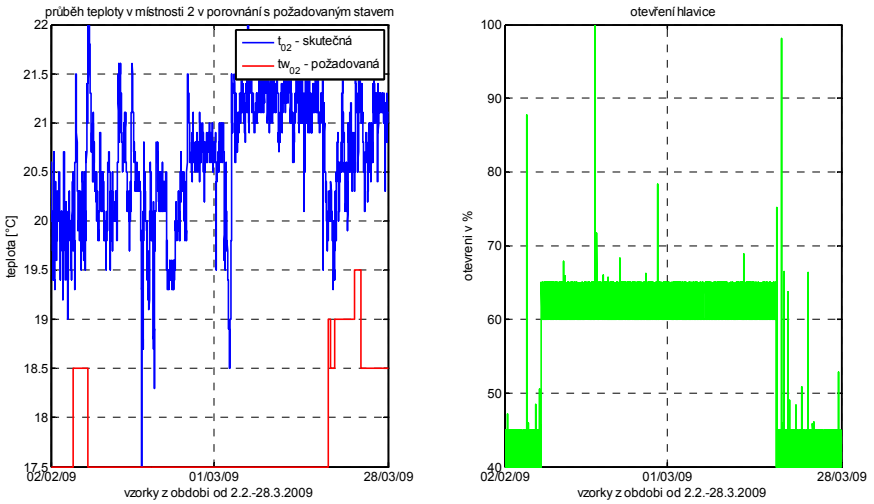
4.2.1. Porovnání referenčních teplot se skutečnými

Při prvním seznámení nás zajímá, jak byl vytápěcí systém schopen udržet referenční hodnotu. Sledovali jsme při tom i hodnotu otevření elektrické hlavice, kterou můžeme považovat za akční zásah. Tento údaj je uveden v % (40 % - 100 %).

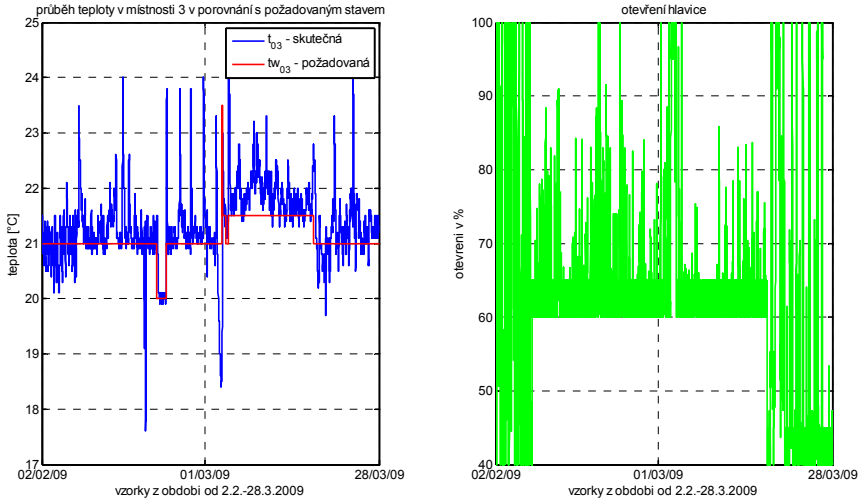
Postupně si tedy vykreslíme grafy teplot ve všech sledovaných místnostech spolu s referenčními hodnotami. Napravo od grafu teplot vykreslíme otevření hlavice, tedy akční zásah.



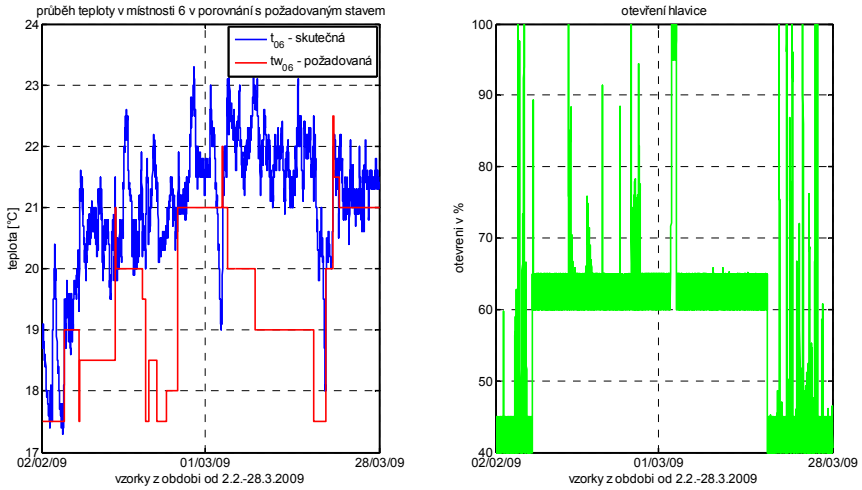
Obrázek 4.2: Vývoj teploty v místnosti 1, akční zásah



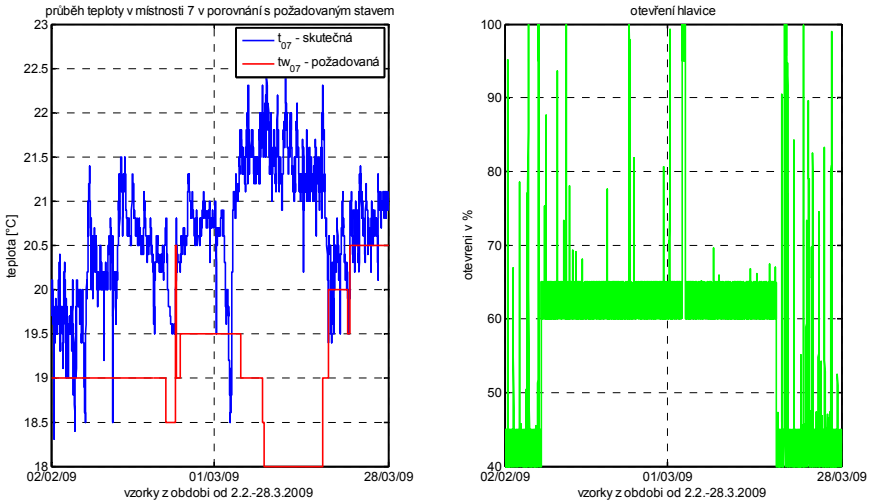
Obrázek 4.3: Vývoj teploty v místnosti 2, akční zásah



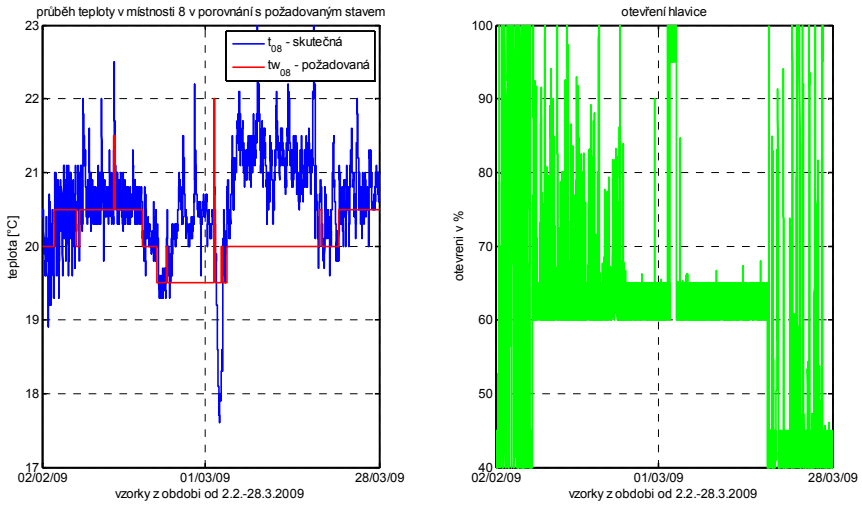
Obrázek 4.4: Vývoj teploty v místnosti 3, akční zásah



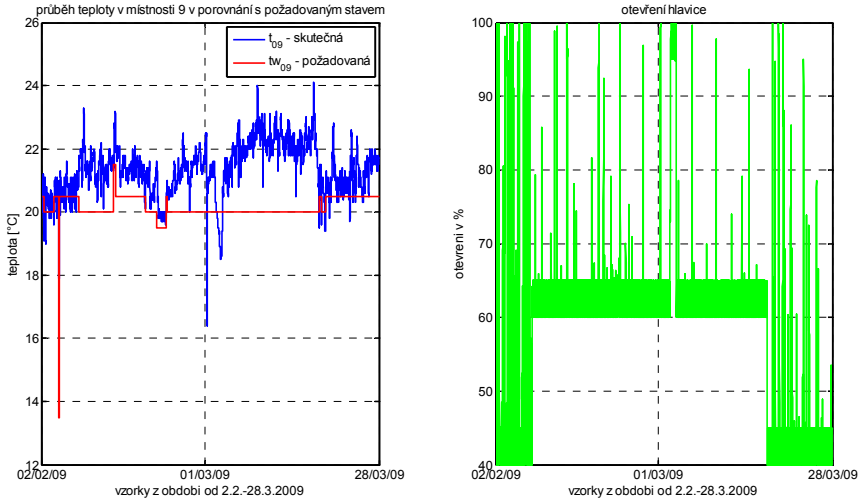
Obrázek 4.5: Vývoj teploty v místnosti 6, akční zásah



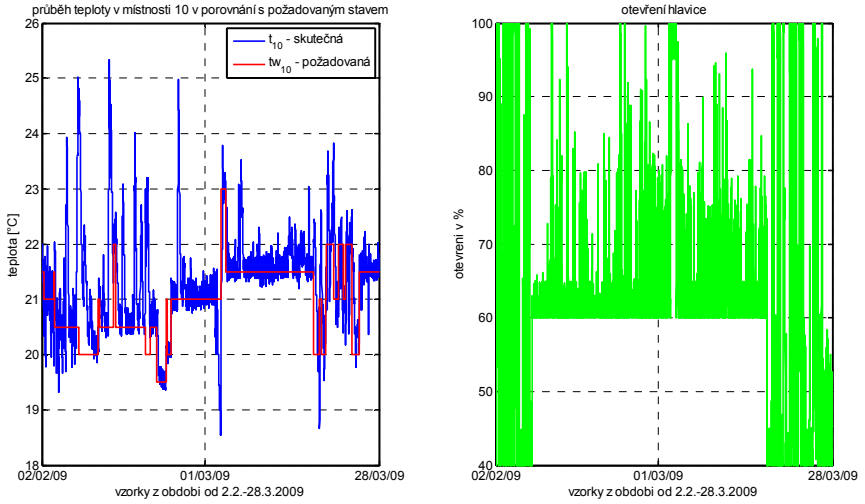
Obrázek 4.6: Vývoj teploty v místnosti 7, akční zásah



Obrázek 4.7: Vývoj teploty v místnosti 8, akční zásah



Obrázek 4.8: Vývoj teploty v místnosti 9, akční zásah



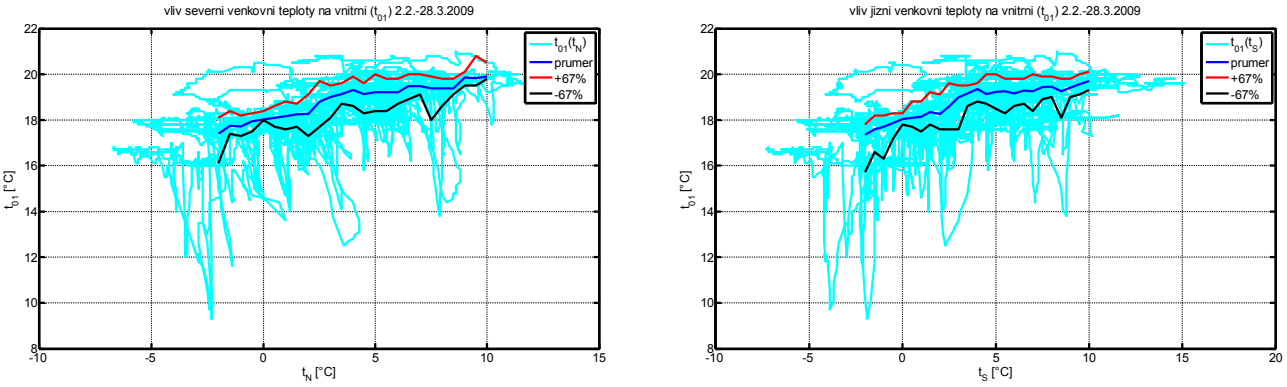
Obrázek 4.9: Vývoj teploty v místnosti 10, akční zásah

Jak si můžeme všimnout z předchozích grafů, ve většině případů docházelo k přetápění místností. V topné sezóně se odchylka pohybuje kolem +1 °C, někdy však i o více.

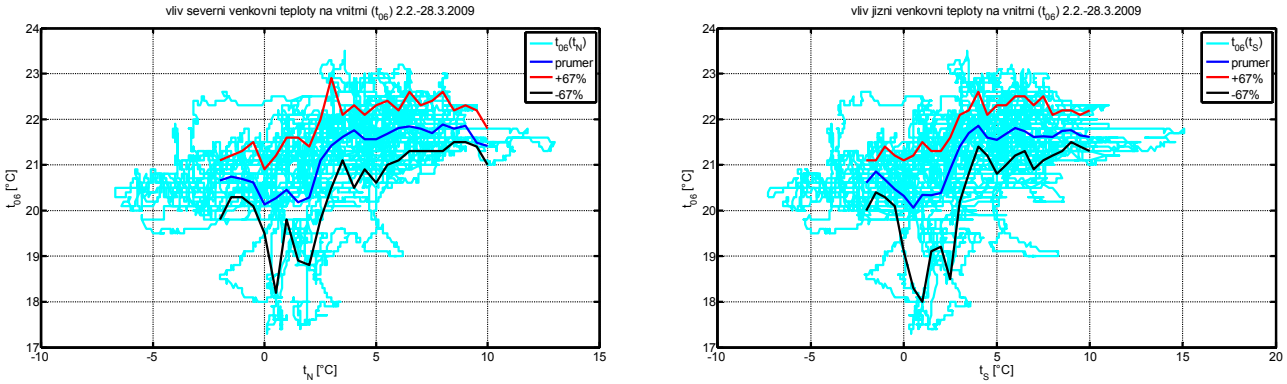
4.2.2. Vliv venkovní teploty

V této části se zaměřím na to, jak se řídicí systém vypořádá s vlivem venkovních teplot. Budeme brát v potaz i vliv světových stran, severní a jižní. Data si rozdělíme do dvou období, do topné sezóny (2. 2. - 28. 3. 2009) a dobu mimo ni (29. 3. - 17. 6. 2009). V grafech je ve slabě modré vynesena teplota v místnosti podle venkovní teploty. Modrá křivka znázorňuje průměr, mezi červenou a černou se nachází 67 % hodnot. Ta byla spočtena tak, že jsme rozdělili venkovní teplotu po 0,5 °C a pro tyto jednotlivé teploty jsme spočítali průměr teplot v místnostech. Nebudeme vykreslovat všechny grafy, omezíme se zda na místnosti 1,6 a 10.

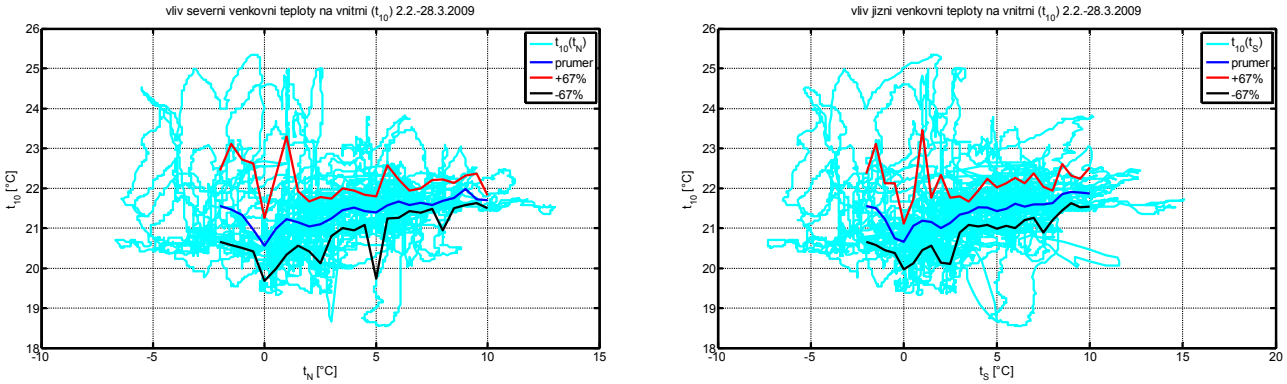
Topná sezóna



Obrázek 4.10 Vliv severní a jižní teploty na teplotu v místnosti 1

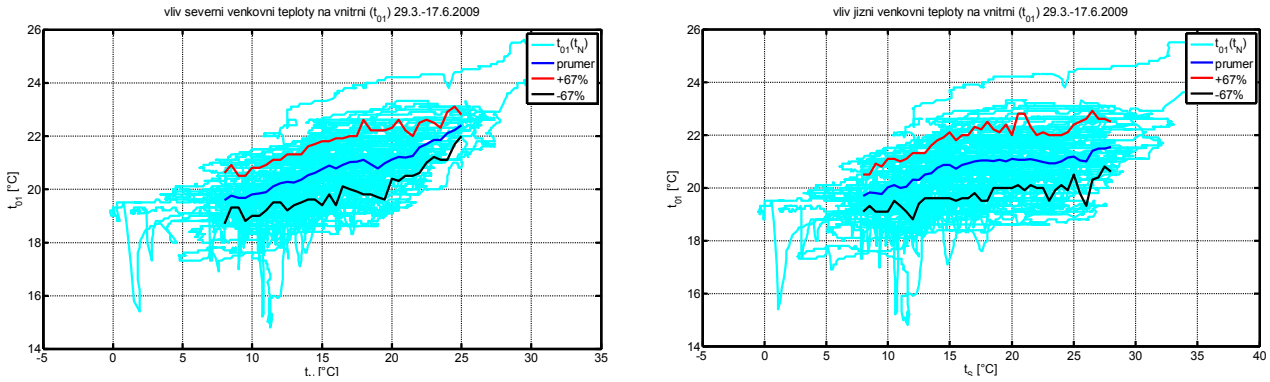


Obrázek 4.11: Vliv severní a jižní teploty na teplotu v místnosti 6

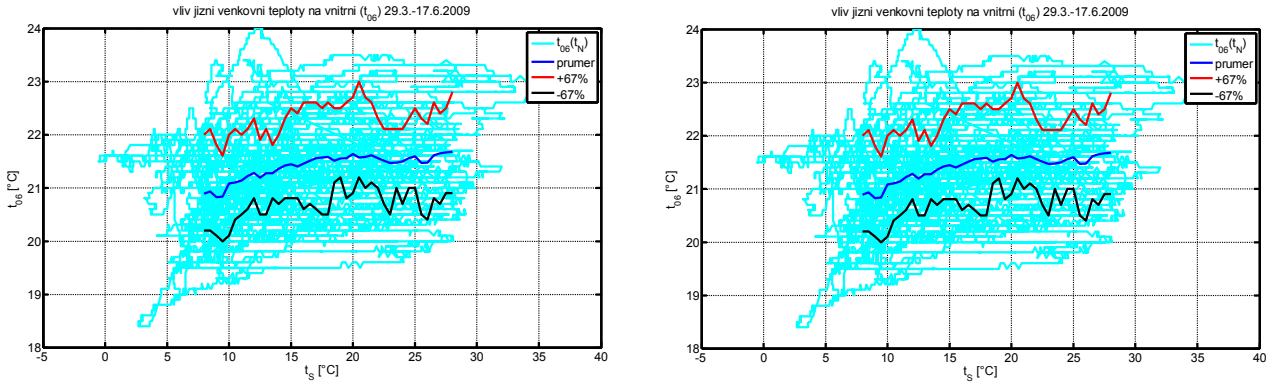


Obrázek 4.12: Vliv severní a jižní teploty na teplotu v místnosti 10

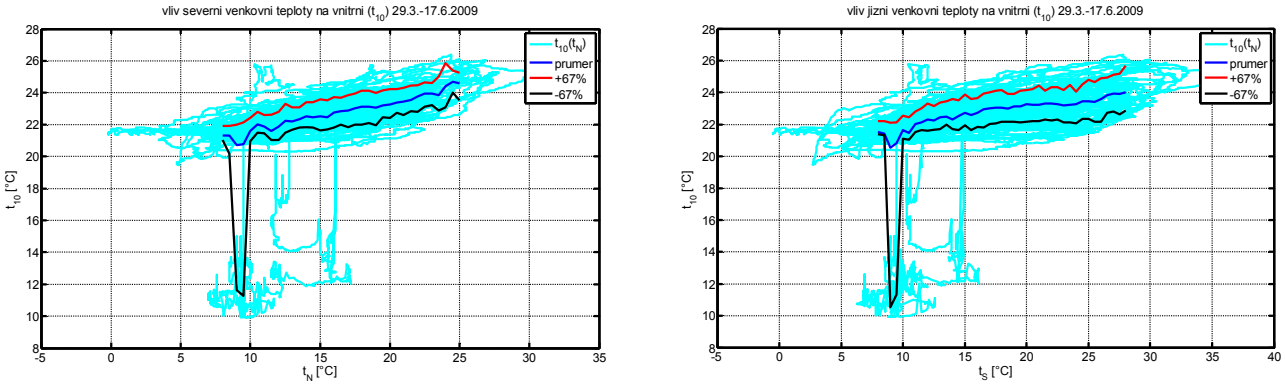
Období mimo topnou sezónu



Obrázek 4.13 Vliv severní a jižní teploty na teplotu v místnosti 1



Obrázek 4.14: Vliv severní a jižní teploty na teplotu v místnosti 6

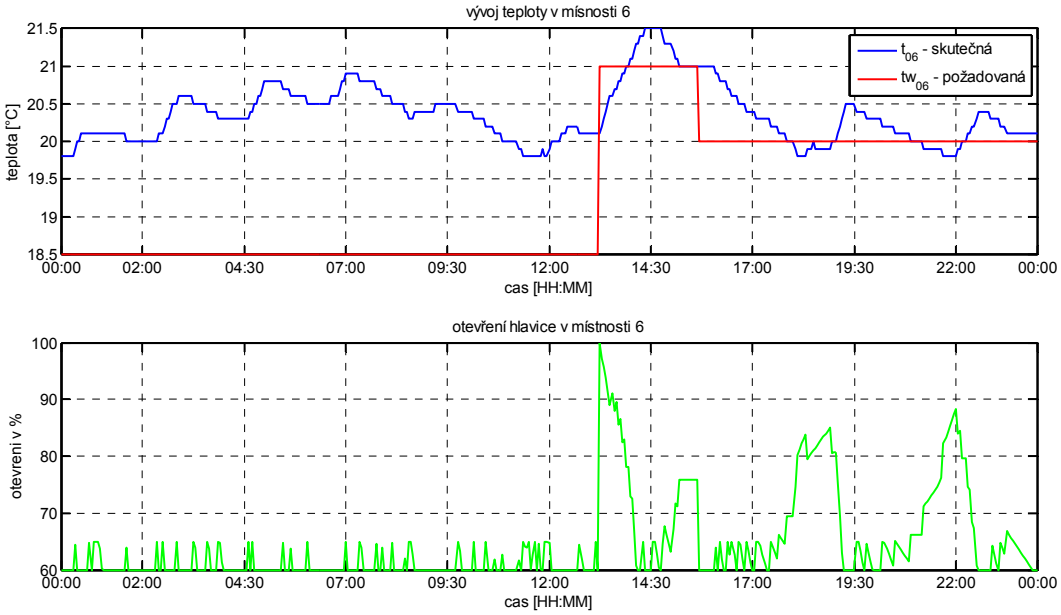


Obrázek 4.15: Vliv severní a jižní teploty na teplotu v místnosti 10

V období mimo topnou sezónu sledujeme, že vnitřní teplota sleduje venkovní s určitou závislostí, kterou by bylo možno aproximovat stoupající lineární funkcí. V topné sezóně má vnitřní teplota podobně stoupající charakter. V okolí venkovní teploty mezi 0 °C až 4 °C si ale můžeme všimnout výrazných skokových odchylek. Možným vysvětlením může být to, že právě v tomto intervalu teplot se výrazně mění tepelná vodivost vody. V tomto rozmezí voda kondenzuje z páry nebo taje led. Vliv venkovní vlhkosti při těchto teplotách může způsobit zmíněné odchylky. Z tohoto souboru grafů pozorujeme, že systém reguluje špatně. Zpětnovazební systém by měl zajistit dosazení referenční hodnoty za různých podmínek.

4.2.3. Akční zásah

Pro lepší představu jak reaguje regulátor na odchylku, jsem si vykreslil následující graf ze dne 14. 2. 2009. Je na něm patrné, jakým způsobem se generuje akční zásah.



Obrázek 4.16: Otevření hlavice v porovnání s vývojem teploty v místnosti 6 dne 14. 2. 2009

Zaměříme se na dobu od 00:00 do 13:00. Zjistíme, že místnost byla přetápěna. Přesto hlavice není nastavena na minimální hodnotu. Čidlo načetlo míru otevření oscilující mezi 60 % až 65 %. Po následující skokové změně referenční hodnoty regulátor zareaguje tím, že plně otevře hlavici. V poslední fázi vidíme, jak regulátor zasáhne, když místnost vychladne pod stanovenou teplotu. Hlavice se v tuto dobu otvírá či přivírá v závislosti na odchylce.

Původní program vycházel z toho, že hlavici je možno regulovat plynule. Akční zásah, otevření hlavice, generoval PID regulátor v závislosti na odchylce. Problémem je však to, že hlavice je dvoustavová a má silně nelineární charakteristiku. PID regulace je proto nevhodná. Tímto bychom mohli vysvětlit oscilaci v první polovině dne.

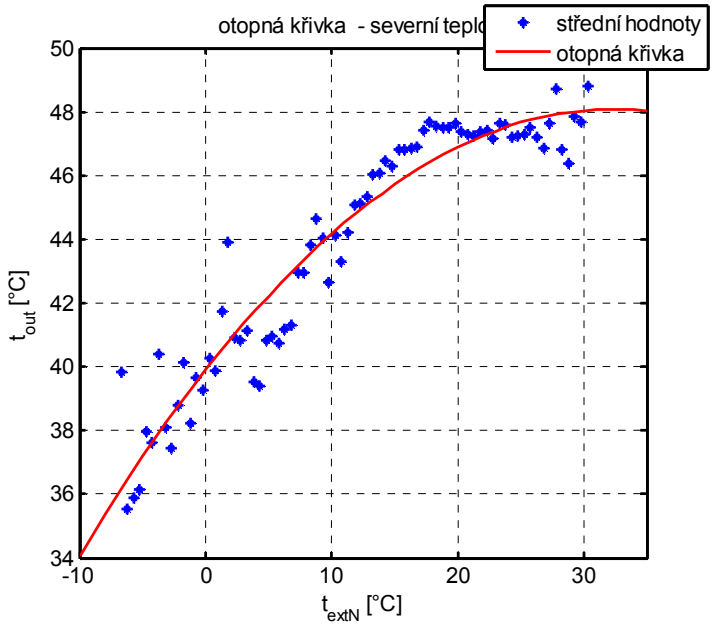
4.2.4. Hospodárnost stávající regulace

V této podkapitole jsem se zabýval stávající PID regulací. Když shrnu, co jsem se o ní dozvěděl, připomenu, že dochází ve většině případů k přetápění místností. I v situaci, kdy je teplota místnosti dostatečná, dvojstavová termohlavice propouští teplou vodu. Z pohledu hospodárnosti energie tedy dochází ke zbytečnému plýtvání energie.

4.3. Ekvitermní regulace

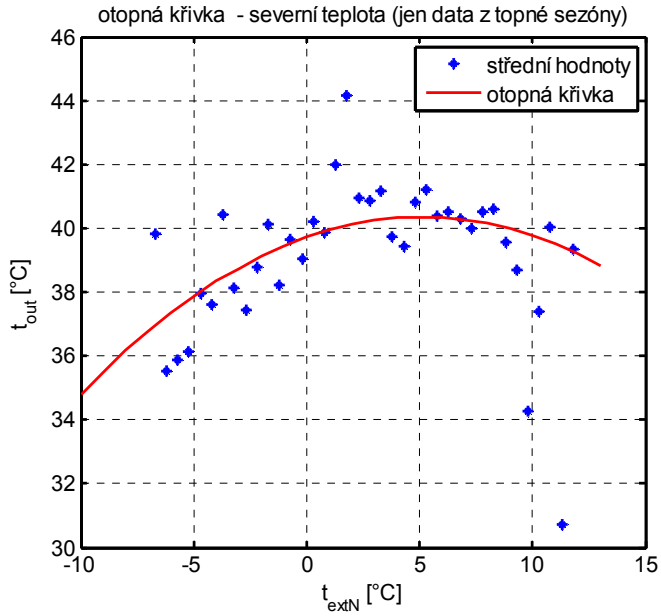
Co je to ekvitermní regulace bylo vysvětleno v kapitole **2.4.2.** Pokusil jsem se jí spočítat z naměřených dat následujícím způsobem. Venkovní teplotu jsem rozdělil po 0,5 °C a pro tyto jednotlivé teploty jsem spočítal průměr teploty výstupní kotlové vody. Poté jsem metodou nejmenších čtverců získal polynomialní rovnici otopné křivky 2. řádu.

4.3.1. Otopná křivka



Obrázek 4.17: Otopná křivka - severní vnější teplota

Rovnice otopné křivky: $t_{out}(t_{eN}) = -0{,}0078t_{eN}^{\ 2} + 0{,}5049t_{eN} + 39{,}9016$

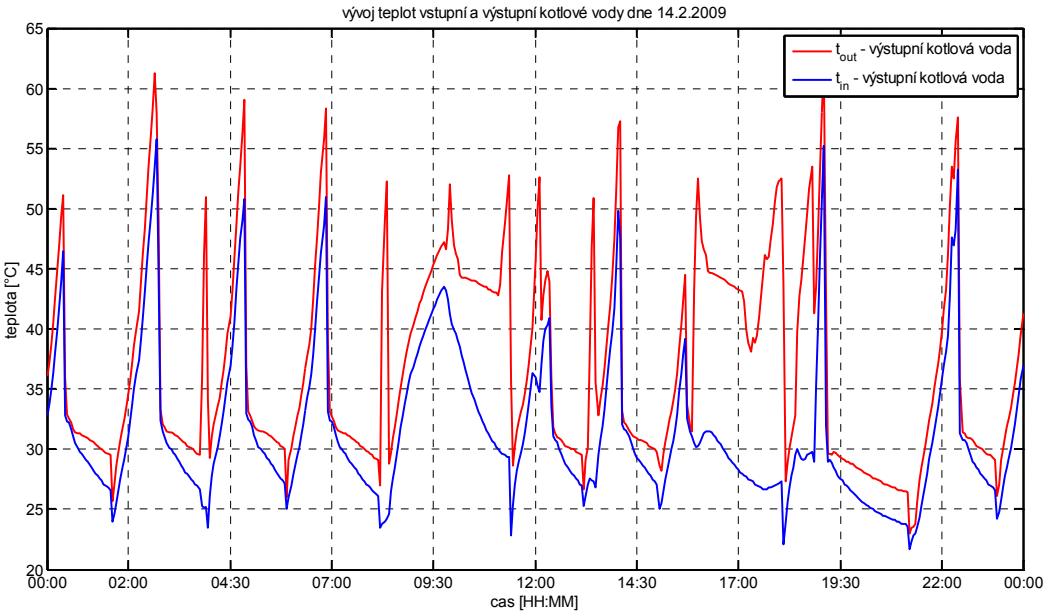


Obrázek 4.18: Otopná křivka - severní vnější teplota (jen data z topné sezóny)

Rovnice otopné křivky: $t_{out}(t_{eN}) = -0{,}0245t_{eN}^{\ 2} + 0{,}2495t_{eN} + 39{,}7208$

Tvar otopné křivky z obrázku **4.17** je sice v souladu s křivkami v **[5]** a **[10]**, zarážející je ovšem to, že při stoupání venkovní teploty stoupá i teplota výstupní vody. To je v protikladu s křivkami v literatuře, ale i se smyslem vytápění budovy. Například informace, že průměrná teplota výstupní vody je 49 °C při venkovní teplotě 30 °C a naopak 35 °C při venkovních -5 °C, naznačuje problém, který bude popsán dále. Na obrázku **4.18** jsem data očistil o hodnoty mimo topnou sezónu. Stále však nedostáváme požadovaný tvar. Abychom našli vysvětlení, pokusíme se podívat podrobněji na vývoj teplot topné vody za a před kotlem.

4.3.2. Průběh teplé vody za kotlem

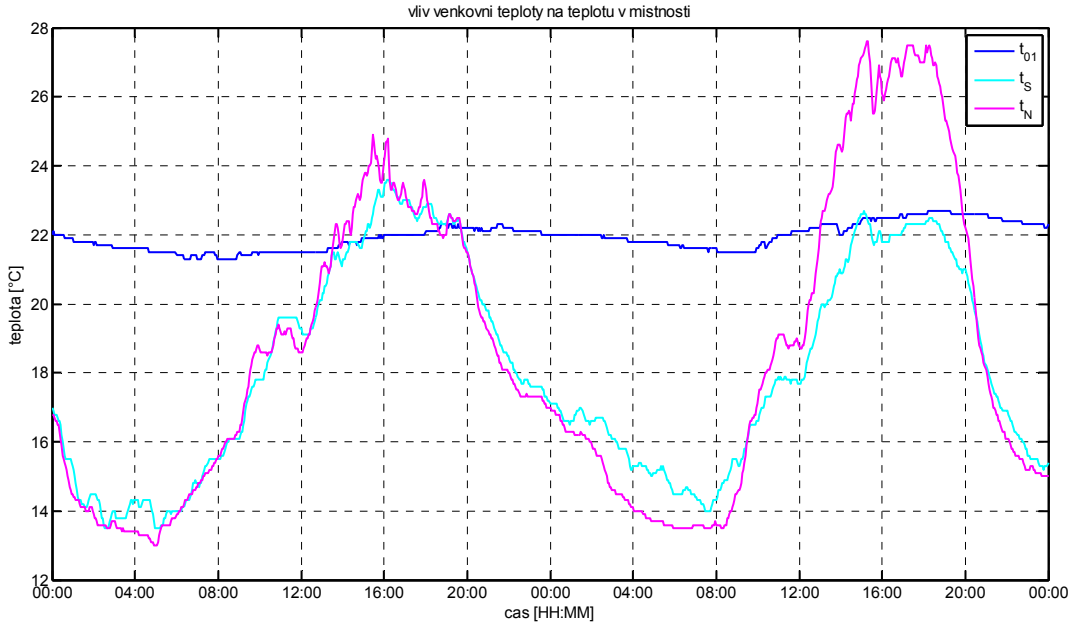


Obrázek 4.19: Vývoj teplot vstupní a výstupní kotlové vody

Na obrázku **4.19** máme vykresleny průběhy teploty vstupní a výstupní kotlové vody ze dne 14. 2. 2009. U rodinných domků bývá obvyklé, že teplota vstupní kotlové vody kopíruje výstupní s rozdílem několika °C. Na tomto obrázku si můžeme všimnout, zejména mezi 9:30 a 12:00 a mezi 15:00 a 18:00, že tento rozdíl činí více jak 10 °C. V kapitole **3.2.1.** popisuji, jak funguje kotel. Je zde i uvedeno, že kotel vyrábí i TUV. Při jejím velkém odběru trojcestný ventil odpojí topnou soustavu a připojí přívod teplé vody do výměníku. Zde dochází k onomu významnému ochlazení topné vody. Stávající systém nedovoluje detekovat tuto situaci. Nejsme tedy schopni data očistit i o tento rušivý jev. Při výpočtu ekvitermní křivky byla použita i data, která zachycují výrobu TUV. Důsledkem je to, že tato data nemůžeme použít pro návrh ekvitermní regulace.

4.4. MPC

Pro složitější MPC regulaci je dobré vědět, s jakým zpožděním reaguje vnitřní teplota na změny ve venkovním prostředí. Tato informace vypovídá o struktuře budovy a o jejich akumulačních schopnostech. Umožňuje nám vytvořit model budovy. Zpoždění budeme sledovat v měsících, kdy venkovní teplota překračuje vnitřní. Toto nám umožní pozorovat postupné vychládání nebo naopak nahřívání budovy v závislosti na venkovních (severní i jižní) teplotách. Tento děj nebude ovlivňován vytápěním.



Obrázek 4.20: Vliv venkovních teplot na teplotu v místnosti 1 ve dnech 17. - 18. 5. 2009

V grafu na obrázku **4.20** jsem se zaměřil na časové zpoždění mezi jednotlivými minimy a maximy. Ve vybraných dnech byly výrazné změny venkovních teplot. Tyto změny nebyly identické, proto je i zpoždění odlišné. Do následující tabulky jsem zaznamenal teploty jednotlivých minim, maxim a průsečíků s časem, kdy byly naměřeny. V posledním řádku je spočteno o kolik se zpozdil vývoj teploty v místnosti oproti vnějšku.

Tabulka 4.1: Zpoždění mezi vnější a vnitřní teplotou

	Min	průsečík	max	průsečík	min	průsečík	max	průsečík
t_S [°C/HH:MM]	13 / 05:06		24,8 / 16:00		13,5 / 08:24		27,6 / 15:21	
t_01 [°C/HH:MM]	21,3 / 08:09	21,6 / 13:30	22,3 / 21:45	22,2 / 19:36	21,5 / 09:57	22,2 / 13:00	22,7 / 19:21	22,6 / 19:48
zpoždění [HH:MM]	3:03		3:05		1:33		4:00	

V prvním dnu vidíme, že zpoždění je velmi podobné, zhruba 3 hodiny – i z průběhů teplot v jiných dnech je vidět, že tato doba je pro náš objekt typická. V grafu se však mohou vyskytovat i rušivá lokální maxima, která způsobují obyvatelé domu (tepelný výkon jedné osoby se může pohybovat kolem 60 W).

Z průběhu letních teplot můžeme tedy usuzovat, že náš objekt má hlavní časovou konstantu zhruba 3 hodiny. V případě MPC řízení můžeme tuto informaci použít pro předběžnou verifikaci modelu budovy. Jak jsem ale uvedl na začátku této kapitoly, MPC řízení není možné v tomto domě použít pro jeho velkou výpočetní složitost, i když se s ním do budoucna jako s variantou počítá.

4.5. Návrh řešení

Vylučovací metodou jsme dospěli k tomu, že jediným zbývajícím způsobem jak regulovat zůstává termostat. Jelikož nejsme schopni regulovat výkon kotle, při úpravě programu se zaměříme na regulaci spotřeby.

4.5.1. Popis nového řešení

V kapitole **4.2.3.** jsme vypozorovali, že nasazení PID regulace u termoelektrické hlavice je nevhodné. Je tomu tak z důvodu jejího dvoustavového chodu. Jako lepší řešení se nabízí použití hystereze. Program byl upraven tak, aby zcela otevřel nebo zavřel hlavici. Kvůli silně nelineárnímu chování hlavice není plynulá regulace možná. V programu jsem nechal tu část, která spíná kotel v případě, je-li v nějaké místnosti nižší teplota než požadovaná. Kotel je ovládán logickým operátorem OR, kde vstupy jsou teploty jednotlivých místností a požadavek výroby TUV. Hystereze byla nastavena tak, aby otevřela hlavici v případě nedostatečné teploty. Cirkulace topné vody v radiátoru zajistí zvýšení teploty na požadovanou teplotu navýšenou o hysterezní diferenci, která je nastavena na ± 0,5 °C. Poté se hlavice uzavře. V momentě, kdy teplota klesne pod požadovanou teplotu sníženou o stejnou hysterezní diferenci, se hlavice opět otevře. Tento cyklus vychládání a ohřívání se pořád opakuje. Úpravu programu PLC Wago zajistil Ing. Ondřej Nývlt.

4.5.2. Filtrace

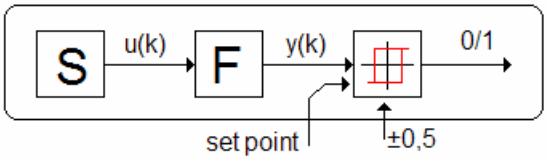
Při snímání teplot jsou čidla ovlivněna šumem a případnou občasnou chybou. Abych omezil její vliv, před samotný regulátor jsem umístnil filtr s exponenciálního zapomínáním. Ten počítá průměr z posledních hodnot, jejichž váhy exponenciálně klesají se vzdáleností od posledního vzorku. Nejstarší vzorek tak má nejmenší váhu. **[11]**

Výstup *y(k)* z tohoto filtru odpovídá rovnici

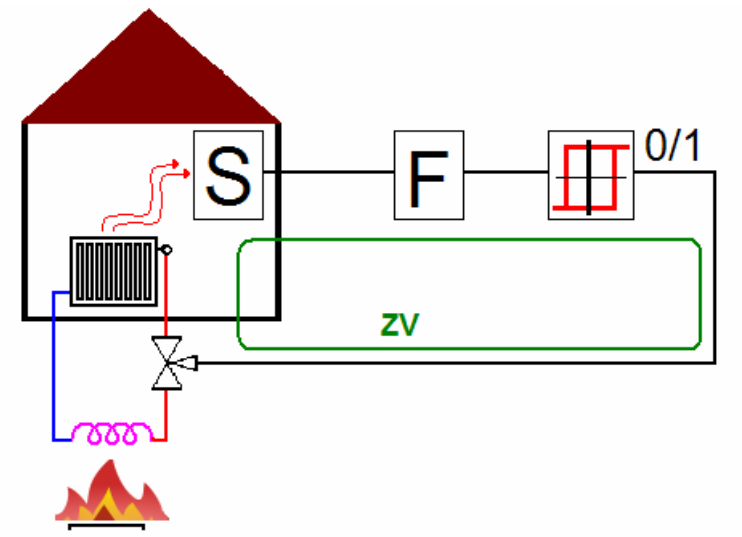
$$y(k) = (1-\alpha)\, y(k-1) + \alpha u(k),$$

kde *u(k)* je vstup a α je parametr filtru $(\alpha \in R^{+}, \alpha < 1)$.

4.5.3. Zapojení regulátoru v soustavě



Obrázek 4.21: Regulátor



Obrázek 4.22: Regulátor v soustavě

Vstupní signál z teplotního senzoru je nejprve veden do filtru. Regulátor dále pracuje s upraveným signálem. Zpětná vazba se uzavírá přes ovládaný ventil, radiátor a nakonec přes uvolňované teplo, které ovlivní teplotu v místnosti.

4.5.4. Porovnání různých regulací

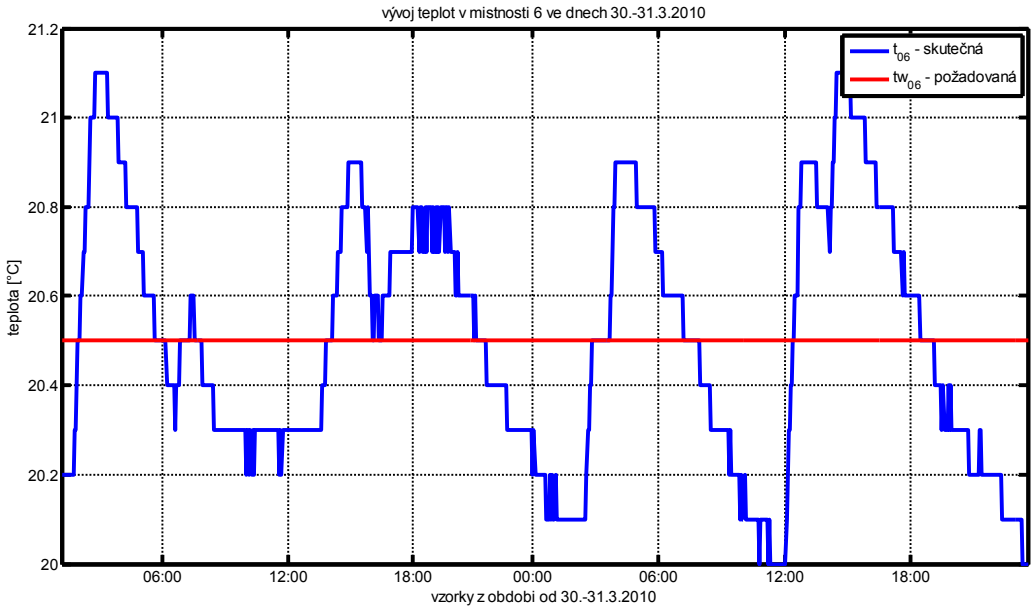
Pro porovnání použiji zmíněné hystereze s filtrací a doposavad používaný PID regulátor. Takto pozměněný program jsem nasadil koncem měsíce března. Během testování nového programu došlo ke komplikacím a program byl v průběhu upravován. Největším problémem bylo to, že docházelo k výpadkům proudu v celém domě. To mělo za následek, že po restartu systému naběhl starý program. Protože se nacházíme již v období, kdy venkovní teploty jsou již poměrně vysoké, nemohl jsem nasazenou regulaci dostatečně otestovat.

Vybral jsem dvě období, ve kterých jsem mohl zaznamenat akční zásahy jednotlivých regulátorů. Jedná se o 30. - 31. 3. 2010, kdy se mi bohužel nepodařilo zaznamenat akční zásah pro místnost 6, pracovnu. Tato místnost byla jako jediná řízena pomocí filtrované hystereze. V místnostech 7, 8, 9 a 10 byla ponechána stávající PID regulace. Protože se hysterezní regulace osvědčila, program byl následně upraven. V období 10. - 13. 4. 2010 byla PID regulace stažena a nahrazena hysterezím řízením. Povedlo se mi upravit program tak, abych mohl zaznamenat akční zásahy pro tento typ řízení. 14.4. došlo k výpadku proudu, což vedlo k přehrání programu původní verzí. Po opravě však již byly teploty tak vysoké, že nebylo zapotřebí topit.

Nyní si ukážeme grafy z prvního období.

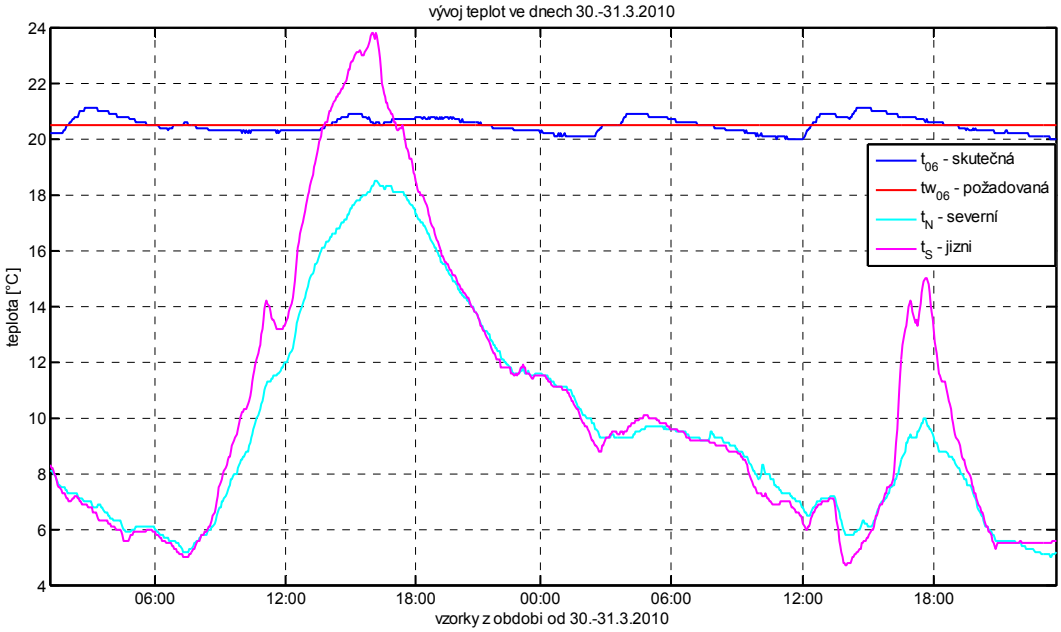
Hystereze s filtrací, březen

Nejprve se zaměříme na detail sledování referenční teploty.



Obrázek 4.23: Vývoj teploty v místnosti 6

Na obrázku **4.23** je vidět, že upravený program je schopen udržet odchylku od referenční hodnoty kolem ± 0,6 °C. Je to podstatné zlepšení oproti původnímu stavu, kdy byl tento rozdíl větší.

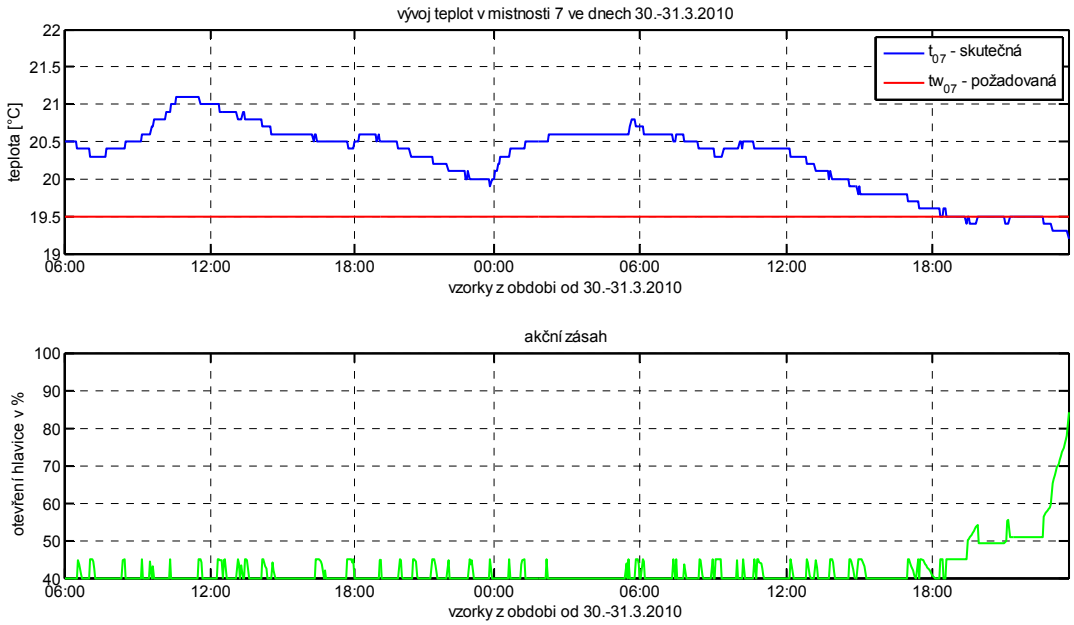


4.24: Vývoj teploty v pracovně a venkovních teplot

Na obrázku **4.24** jsou spolu s teplotou v místnosti uvedeny i venkovní teploty. Vidíme, že je tato zpětnovazební regulace schopna kompenzovat různé vlivy venkovních podmínek.

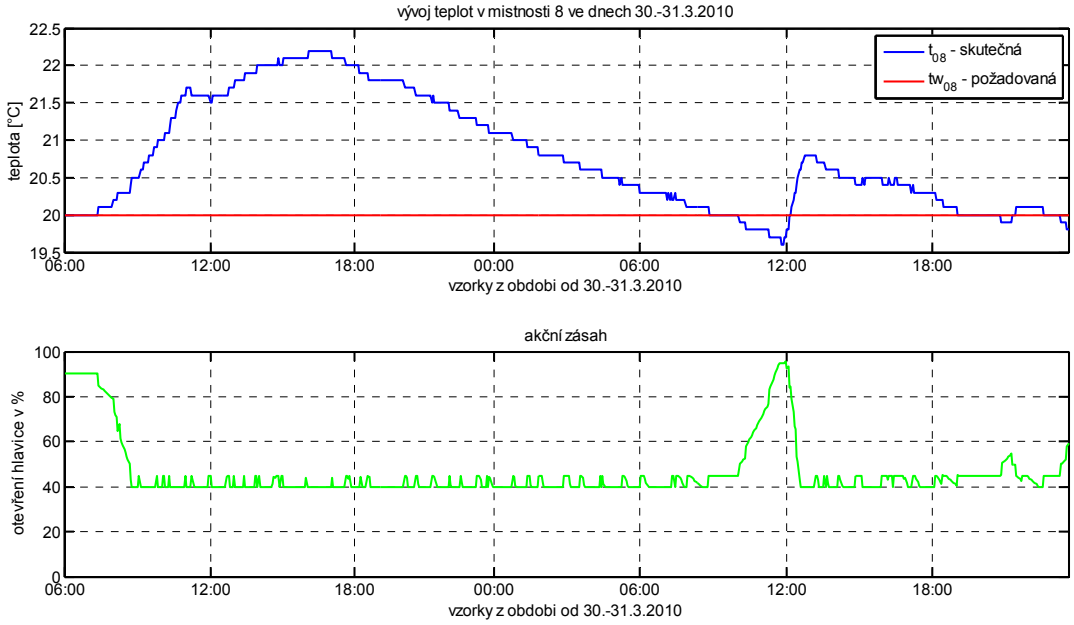
PID, březen

V následujících místnostech jsem ponechal PID regulaci.

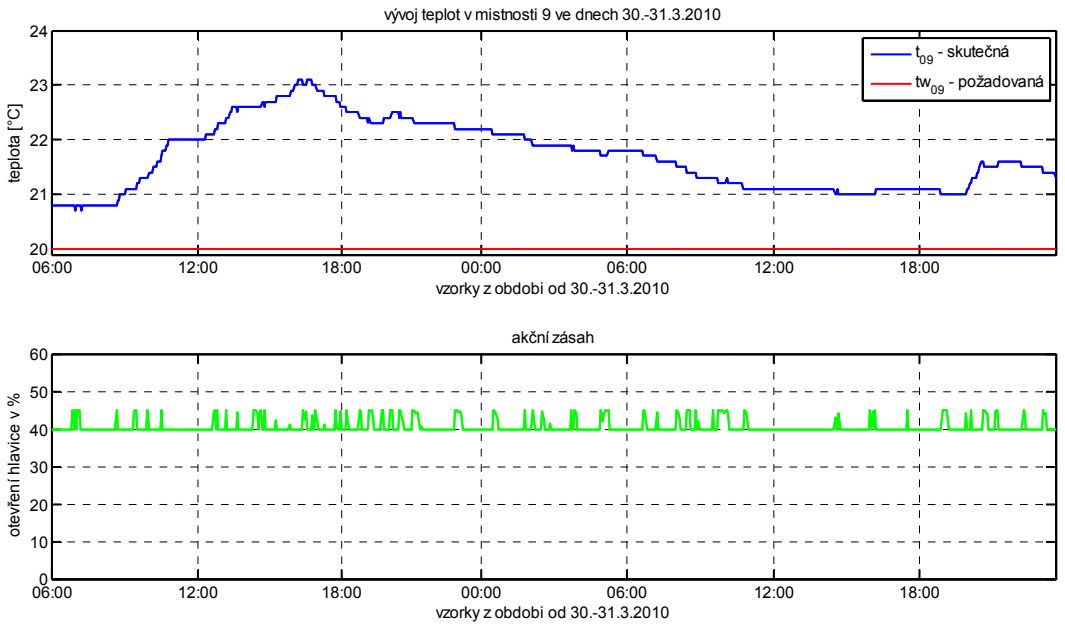


Obrázek 4.25: Vývoj teploty v místnosti 7, akční zásah

V závěru tohoto období vidíme, že regulátor skutečně zasáhne při dosažení nižší teploty než požadované (obrázek **4.25**). Ale předtím, kdy to není žádoucí, generuje oscilující signál.



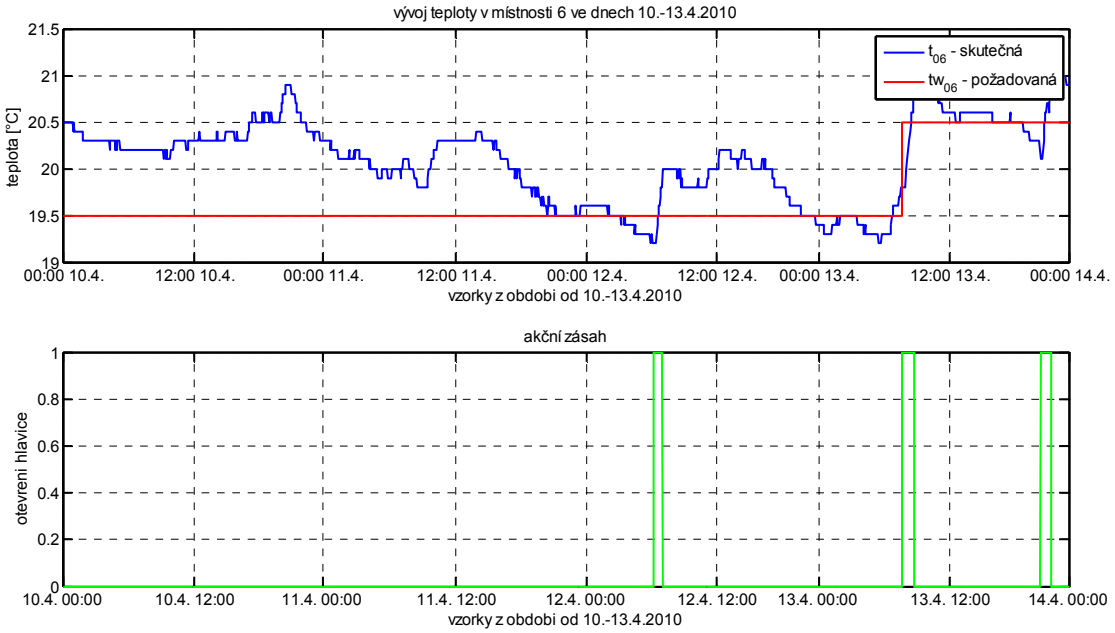
Obrázek 4.26: Vývoj teploty v místnosti 8, akční zásah



Obrázek 4.27: Vývoj teploty v místnosti 9, akční zásah

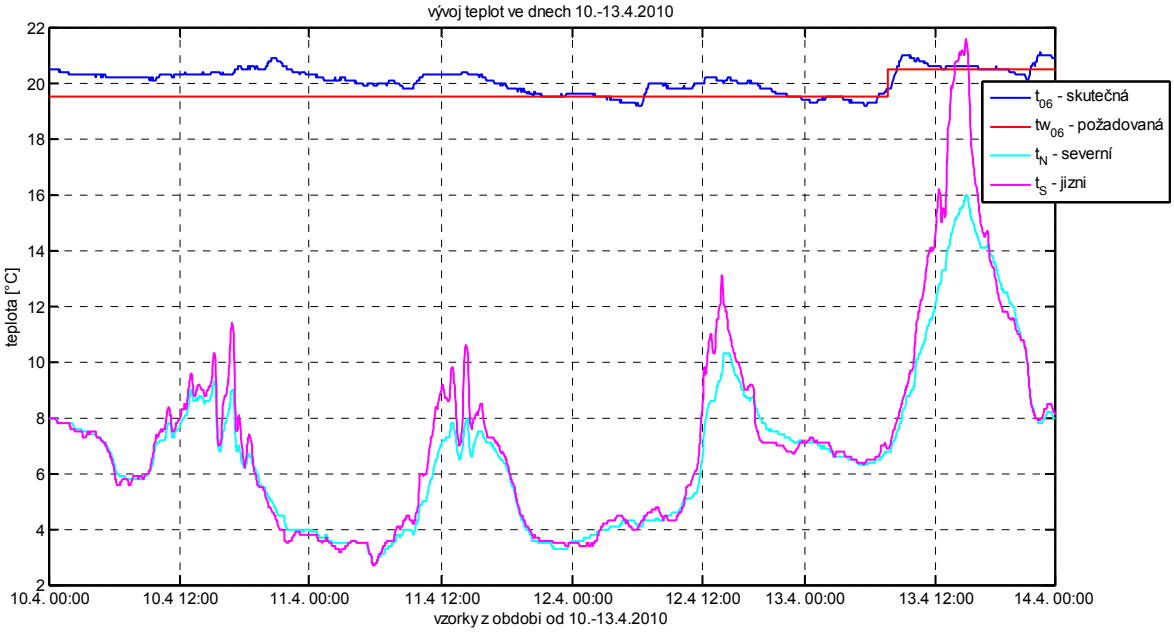
V místnosti 9 teplota neklesla pod požadovanou hodnotu, akční zásah by tedy měl být nulový. PID regulace opět generuje oscilující signál.

Hystereze s filtrací, duben



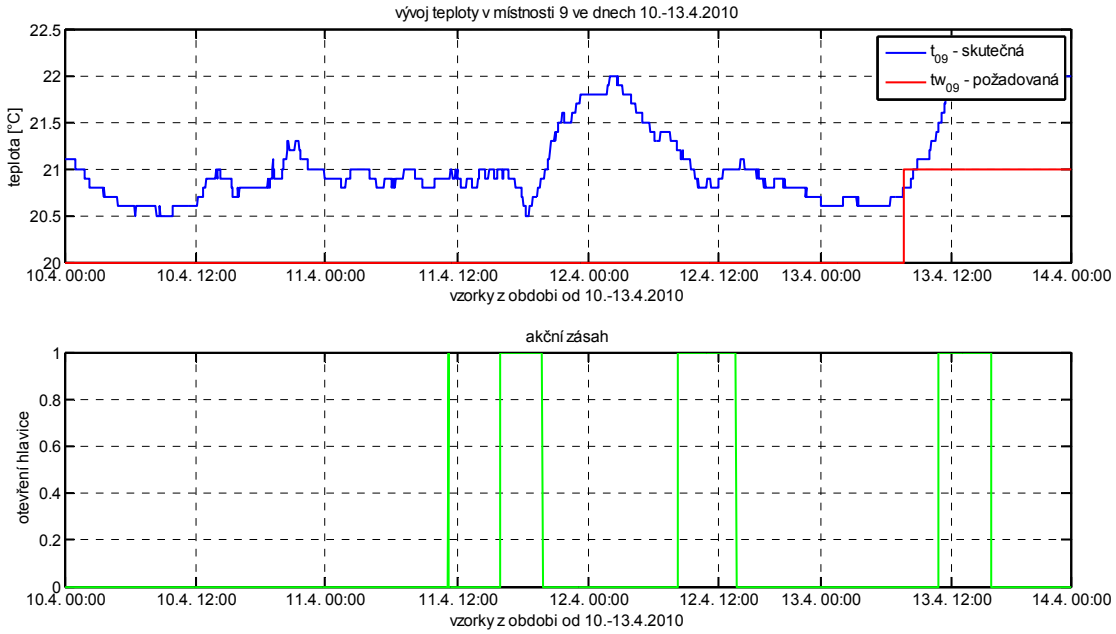
Obrázek 4.28: Vývoj teploty v místnosti 6, akční zásah

V tomto grafu je patrné, že kladná odchylka je větší než 0,5 °C. Jak je ale vidět z podgrafu akčního zásahu, není to ale způsobeno přetápěním kotle. Následující graf ukáže vliv venkovní teploty.



Obrázek 4.29: Vývoj teploty v místnosti 6 a venkovních teplot

Na obrázku **4.30** vidíme průběh z místnosti 9 – dětského pokoje. Zde se zdá, že byla chybně uložena referenční teplota. Regulátor zjevně reguluje nikoliv na 20 °C, ale na 21 °C. Tento fenomén se v řídicím systému objevuje častěji, jeho příčinu se však bohužel nepodařilo odhalit.

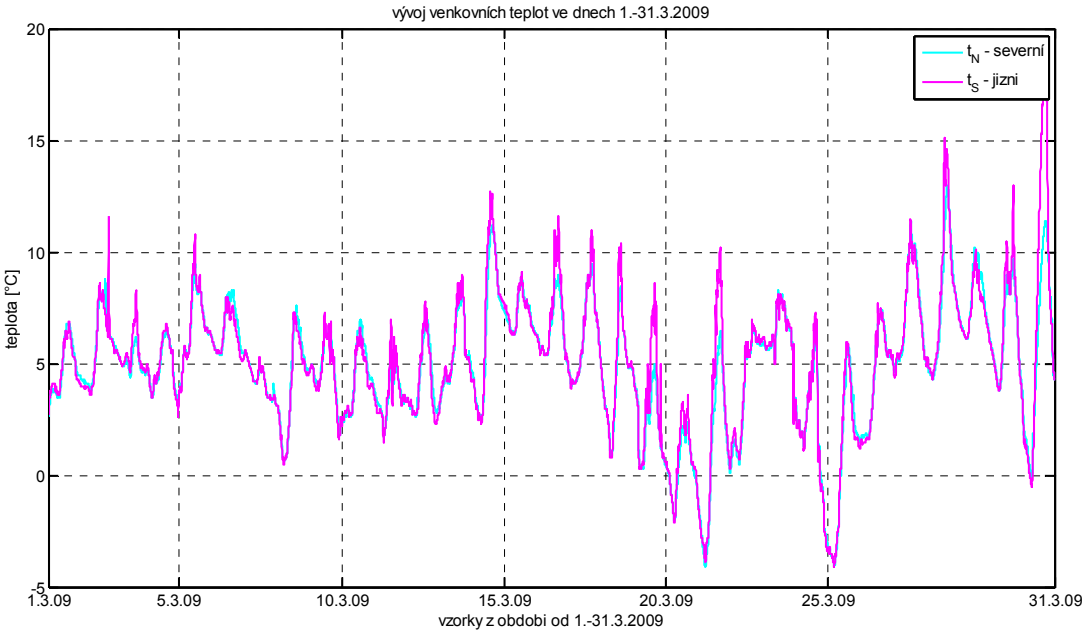


4.30: Vývoj teploty v místnosti 9, akční zásah

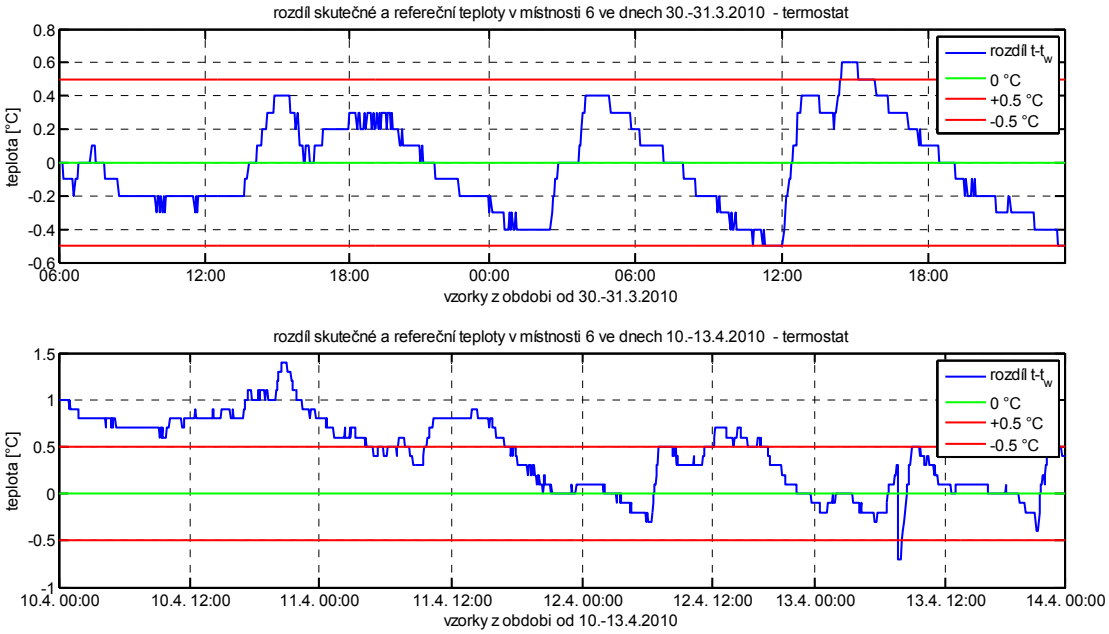
Kapitola 5

Výsledky

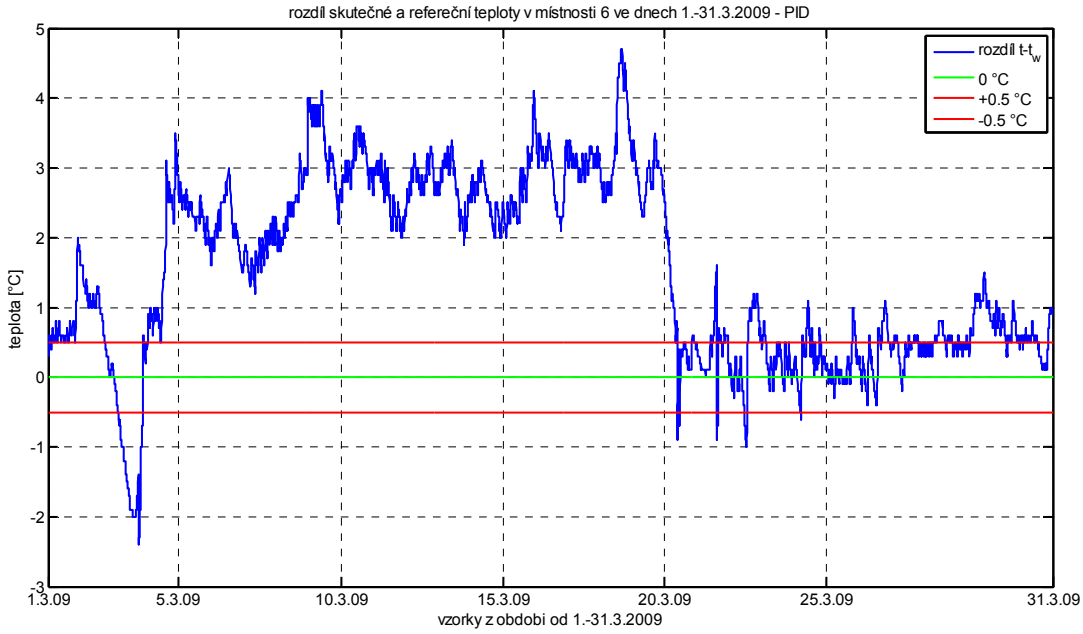
Budeme-li chtít zhodnotit výsledky nové regulace, vykreslíme si grafy, kde zaznamenáme rozdíl mezi skutečnou a referenční teplotou. Pro každou testovanou místnost si vykreslíme rozdíl pro obě pokusná období a zároveň i pro březen loňského roku. Průměrná teplota se v té době pohybovala kolem 5 °C. Počasí tedy bylo dostatečné chladné tak, aby umožnilo vytápění. Pro názornost si ukážeme vývoj venkovních teplot v tomto měsíci.



Obrázek 5.1: Vývoj venkovních teplot v březnu 2009

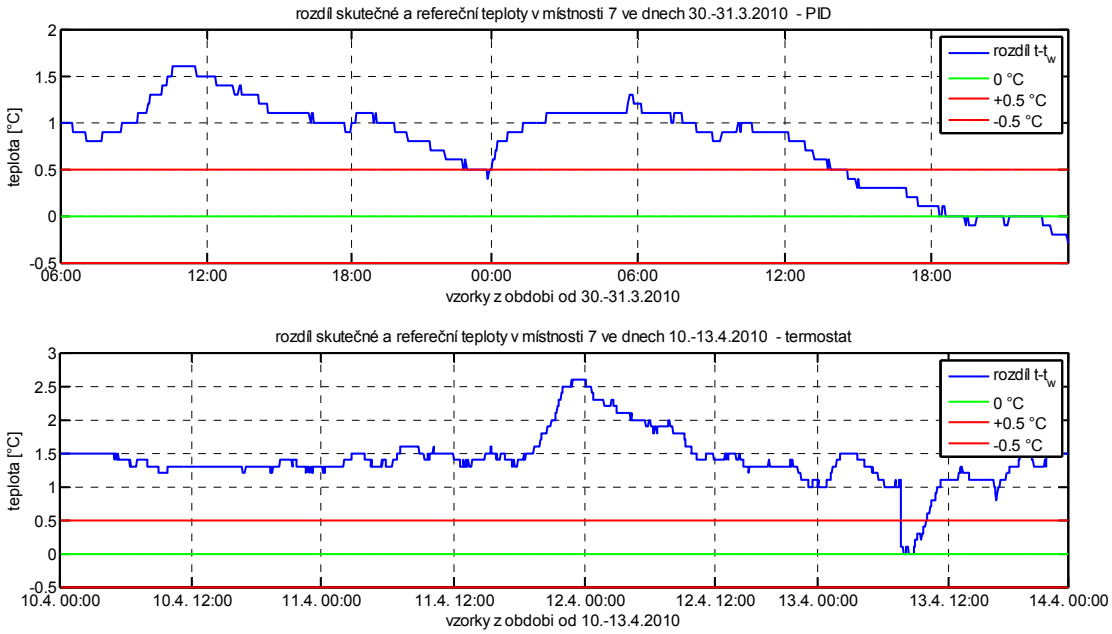


Obrázek 5.2: Rozdíl skutečné a referenční teploty v různých časových obdobích pro místnost 6

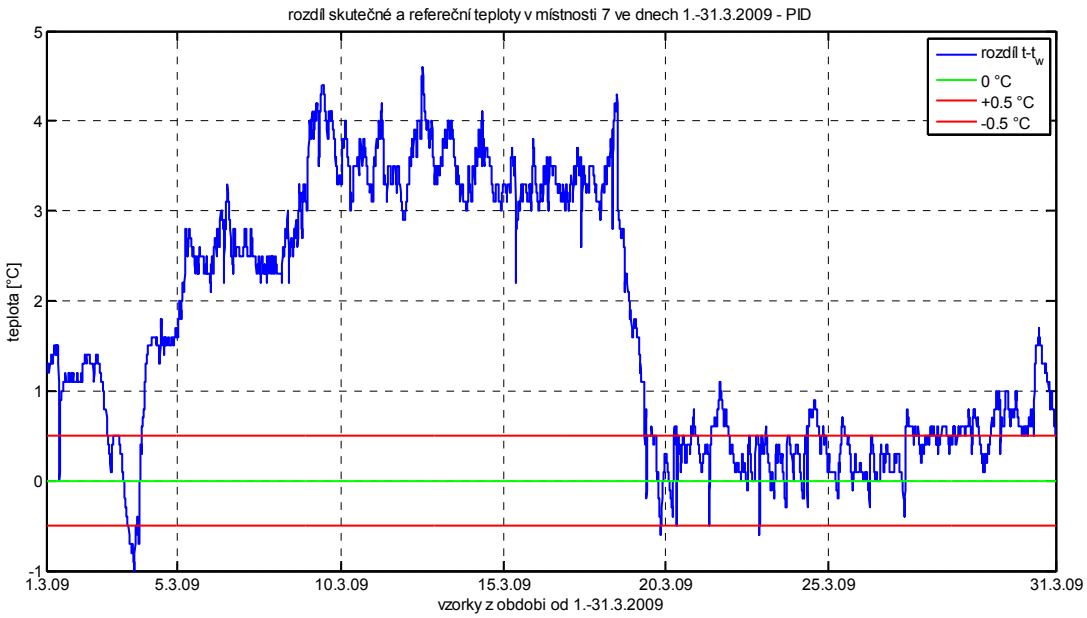


Obrázek 5.3: Rozdíl skutečné a referenční teploty v březnu 2009 pro místnost 6

V prvním testovaném období jsou výsledky velmi pěkné. Nedochází ani k přetápění, ani k nedostatečnému vytápění místnosti. Ve druhém období je záporná odchylka také přijatelná. Kladná odchylka by neměla být způsobena přetápěním, jak jsme již ukázali v kapitole **4.5.4.** Pravděpodobně se jedná o vliv venkovní teploty. Pro porovnání jsme ukázali i rozdíl teplot z loňské zimy. Protože jsem záměrně vybral měsíc, kdy byla dostatečná zima a místnost je orientována na sever, můžeme zhodnotit, že v první části března byla místnost přetápěna.

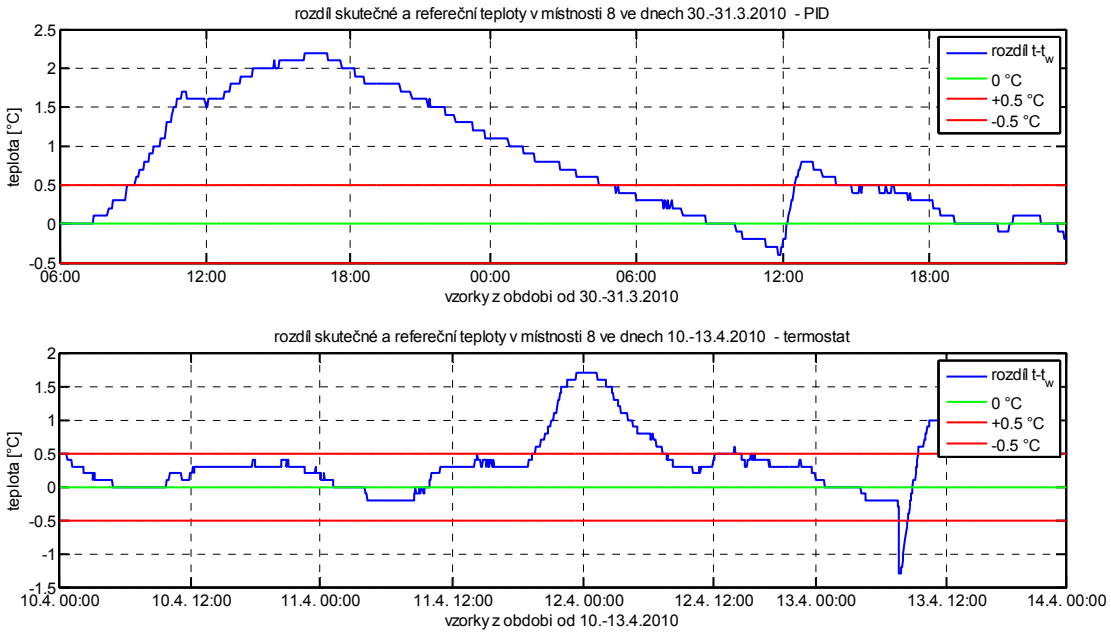


Obrázek 5.4: Rozdíl skutečné a referenční teploty v různých časových obdobích pro místnost 7

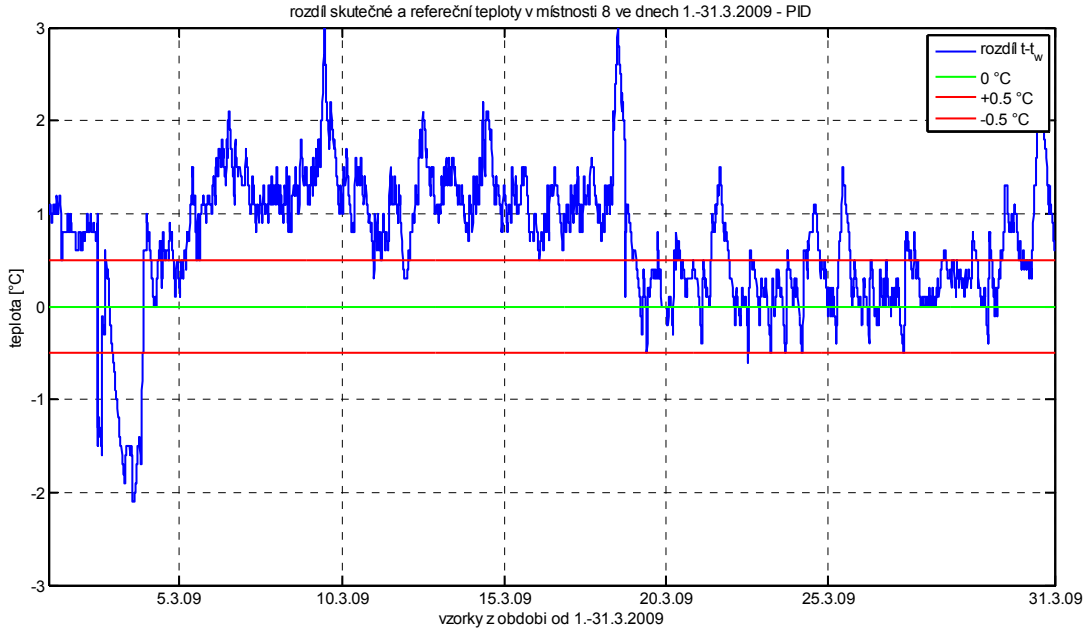


Obrázek 5.5: Rozdíl skutečné a referenční teploty v březnu 2009 pro místnost 7

Místnost 7, ložnice nebyla ve sledovaném testovacím období vytápěna s výjimkou konce 31. 3. 2010. Není proto možné objektivně zhodnotit regulaci.

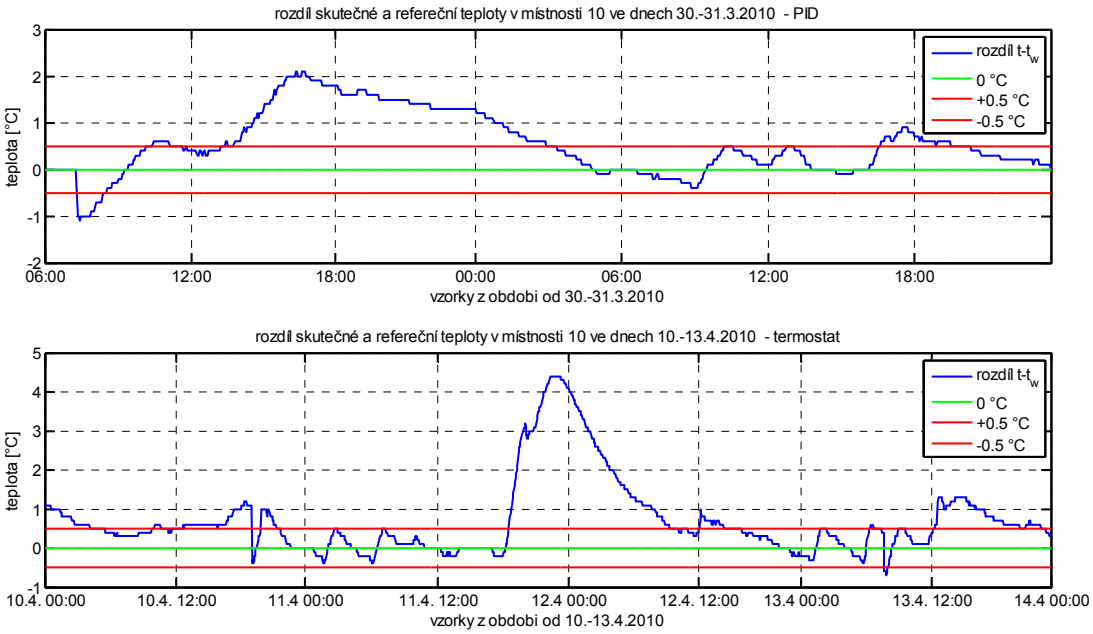


5.6: Rozdíl skutečné a referenční teploty v různých časových obdobích pro místnost 8

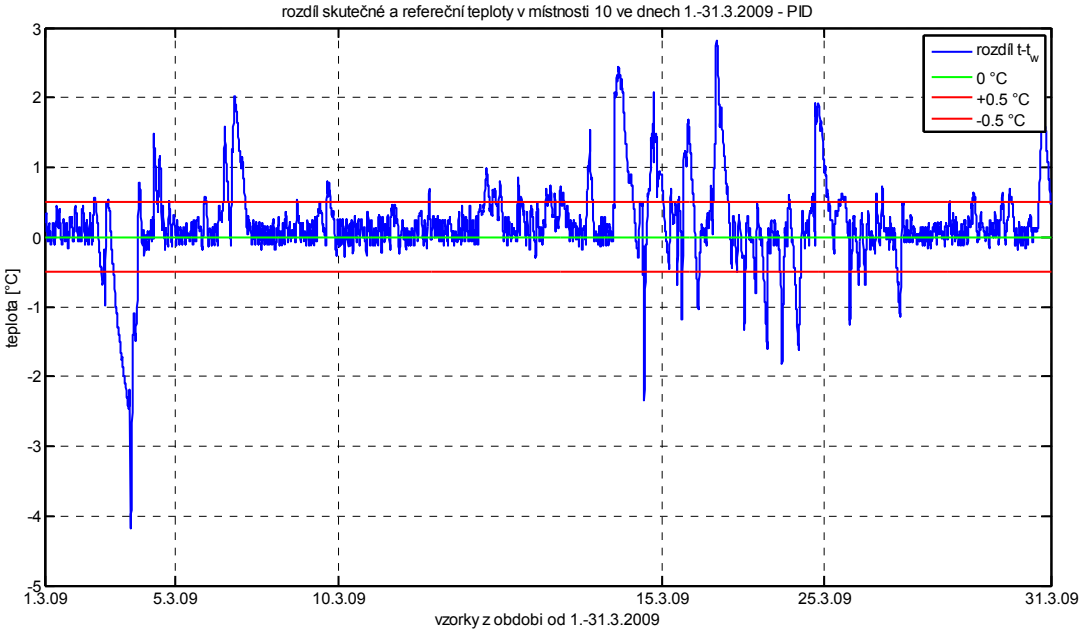


Obrázek 5.7: Rozdíl skutečné a referenční teploty v březnu 2009 pro místnost 8

V místnosti 8 docházelo k přetápění při použití obou regulací. Místnost je orientována na jihovýchod, což může způsobovat přílišné ohřívání místností.



Obrázek 5.8: Rozdíl skutečné a referenční teploty v různých časových obdobích pro místnost 10



Obrázek 5.9: Rozdíl skutečné a referenční teploty v březnu 2009 pro místnost 10

Regulace teploty novým způsobem (prostřední graf) v místnosti 10 nevykazovala zápornou odchylku. V tomto je vidět zlepšení oproti původnímu stavu. K přetopení dne 12. 4. 2010 došlo pravděpodobně díky tomu, že se zatopilo v krbu (přetopení vykazují všechny místnosti v domě).

Upravený program velmi dobře řídí teplotu v místnosti 6 – pracovně. V ostatních místnostech je zajištěno, aby teplota v místnosti neklesla pod stanovenou teplotu sníženou o rozdílovou hodnotu hystereze. Kladná odchylka ovšem zůstává. Tyto místnosti jsou ovlivněny venkovními teplotami. V místnosti 10, obývacím pokoji, je navíc umístěn krb, který teplotu v místnosti může významně ovlivnit. Teplotu například v ložnici mohou ovlivňovat otevřené dveře. Tyto informaci ale nejsme schopni zachytit a interpretovat. Pracovna, která je umístněna na sever a není ovlivňovaná slunečním svitem, je jediná místnost,

která nám umožňuje zhodnotit regulaci. S odkazem na grafy z této kapitoly a kapitoly **4.5.4.** týkající se pracovny můžeme říci, že řídicí systém drží požadovanou teplotu a nedochází ke zbytečnému plýtvání energie.

Kapitola 6

Závěr

V první části této práce jsem se seznámil s problematikou vytápění. Uvedeny byly různé druhy vytápění a typy regulace. Právě konkrétní případ vytápěcího zařízení nebo další faktory jako jsou teplonosné médium, technický stav budovy, palivo nebo energie, kterou chceme využít, ovlivňují návrh řídicího systému. V této práci se setkáváme s teplovodním vytápěním. Následně jsem se tedy na něj zaměřil.

Ve druhé části jsem se od obecného přehledu dostal ke konkrétnímu problému a objektu. Z více možností řízení vytápění jsem se snažil vybrat tu nejvhodnější. Využil jsem k tomu data, která byla zaznamenána v loňské topné sezóně. Postupně jsem prošel možné varianty regulace a vysvětlil jsem, proč je nebo není vhodné použít dané přístupy. Tato analýza byla ztížena tím, že do regulovaného systému vstupují různé rušivé vlivy, které nelze ovlivnit ani detekovat. Mezi ně patří zejména krb a ohřev užitkové vody v zásobníku.

Z různých důvodů jsem vyloučil PID, MPC a ekvitermní regulaci. Zvolil jsem nakonec tu nejjednodušší možnost regulace, kterou je termostat, a to kvůli nemožnosti plynulé regulace výkonu kotle a otevření ventilů radiátorů. To bylo realizováno ovládáním ventilů u radiátoru.

Nejprve jsem vyzkoušel tuto regulaci v jedné místnosti, abych neochromil chod domácnosti obývaného domu v případě neúspěchu. Po slibných výsledcích jsem tuto regulaci nasadil i do jiných místností, kde jsem v testování pokračoval až do konce topné sezóny. Přestože výsledky nejsou zcela ideální, zlepšení oproti původnímu stavu je zřejmé, zejména díky lepšímu sledování reference a menšímu přetápění.

Reference

[1] JELÍNEK, V., KABELE, K. *Technická zařízení budov 20.* Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001.

[2] MURTINGER, K., SRDEČNÝ, K., HUDCOVÁ, L. *Hestia 5.0 VIVID - Encyklopedie 2008* [online]. [cit. 2010-05-12], ⟨http://hestia.energetika.cz/encyklopedie/5.htm/⟩.

[3] Webové stránky portálu kasa.cz [online]. [cit. 2010-04-28], ⟨http://www.kasa.cz/dum-zahrada-krmivo/koupit/913530/rott/rott-gobi/⟩.

[4] NÝVLT, O., KUBEČEK, J. *Vytápění a jeho regulace.* ČVUT FEL, Praha 2010

[5] BAŠTA, J. *Regulace vytápění.* Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007.

[6] Webové stránky společnosti Protherm [online]. [cit. 2010-05-11] ⟨http://www.protherm.cz/upload/download/prospekt_Rejnok_10_03_K212682151173037139 44.pdf⟩.

[7] Webové stránky společnosti Protherm [online]. [cit. 2010-05-11] ⟨http://www.protherm.cz/upload/download/PP%204-1%20ver-2%20Rejnok124954572197756 5519.pdf⟩.

[8] Webové stránky společnosti Siemens [online]. [cit. 2010-05-11] ⟨http://www.siemens.cz/siemjetstorage/files/49988_N4878C$STP21$71$$.pdf⟩.

[9] Webové stránky společnosti Wago [online]. [cit. 2010-05-11] ⟨http://www.wago.com/wagoweb/documentation/750/eng_manu/841/m0841qs1e.pdf⟩.

[10] FERKL, L. *Controller Design For Heating System Of A Building.* Praha, 2004.

[11] HLAVÁČ, V., SEDLÁČEK M. *Zpracování signálů a obrazů.* Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000.

Ostatní literatura (bez citací)

UNDERWOOD, C. P. *HVAC Control System – Modeling, Analysis and Design,* Londýn: E&FN SPON, 2000.

BROŽ, K. *Vytápění.* Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002.

ŠÍCHA, J. *Ústřední vytápění bytů rodinných domků.* Praha: Tisková, ediční a propagační služba, 1971.

ROUBAL, J. Jirkovy stránky, [online]. [cit. 2010-05-11] ⟨http://support.dce.felk.cvut.cz/pub/roubalj/⟩.

Webové stránky společnosti The MathWorks [online]. [cit. 2010-05-11] ⟨http://www.mathworks.com/⟩.

Webové stránky Ústřední knihovny ČVUT v Praze [online]. [cit. 2010-05-11] ⟨ http://knihovny.cvut.cz/⟩.

Obsah CD

Na přiloženém CD jsou

- bakalářská práce ve formátu pdf,
- data, která posloužila k analýze,
- testovací data,
- zdrojové kódy,
- katalogové listy použitých zařízení.