

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ŘÍDICÍ TECHNIKY



ŘÍZENÍ VYTÁPĚNÍ BUDOVY
DIPLOMOVÁ PRÁCE

Jakub Kubeček

2009

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Jakub Kubeček**

Studijní program: Elektrotechnika a informatika (magisterský), strukturovaný
Obor: Kybernetika a měření, blok KM1 - Řídicí technika

Název tématu: **Řízení vytápění budovy**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s možnostmi řízení vytápění budov.
2. Na vhodné budově (dodá vedoucí práce) navrhnete různé regulace systému topení.
3. Porovnejte výsledky z hlediska energetických úspor, kvality regulace a praktické využitelnosti.

Seznam odborné literatury:

Dodá vedoucí práce

Vedoucí: Ing. Lukáš Ferkl, Ph.D.

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2009/10


prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry




doc. Ing. Boris Šimák, CSc.
děkan

V Praze dne 27. 2. 2009

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ŘÍDICÍ TECHNIKY



ŘÍZENÍ VYTÁPĚNÍ BUDOVY
DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor: Jakub Kubeček

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

Oponent diplomové práce: Ing. Jan Široký

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Lukáši Ferklovi, Ph.D. za ochotu a cenné informace v průběhu práce. V neposlední řadě chci poděkovat své přítelkyni a rodině a za veškerou podporu v průběhu celého studia.

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

V Praze dne 13. 5. 2009

A handwritten signature in blue ink on a light yellow rectangular background. The signature is cursive and appears to read 'Hubert'.

podpis

Anotace:

Tato práce je věnována řešení problému řízení regulace stropního topení v několikapatrové školní budově ČVUT v Praze - Dejvicích. Budova je rozdělena na několik nezávislých bloků. Jednotlivé bloky mají navzájem oddělené topné okruhy. K dispozici jsou záznamy z dosavadního provozu vytápění. Byla provedena analýza těchto dat, vybrány vhodné úseky bez poruch a dostatečné délky, shromážděny dostupné technické informace o stávajícím systému, nastudovány možné způsoby řízení vytápění, vytvořen model systému pomocí Subspace metod. Na základě získaných poznatků byl navrhnout prediktivní regulátor (MPC), který počítá kvadraticky optimální řízení na konečném horizontu predikce. Vše bylo implementováno v prostředí Scilab a otestováno na řídicím průmyslovém počítači. Během zkoušek nedošlo k žádným vážným problémům. Systém se jevil jako provozuschopný a vhodný pro řízení vytápění školní budovy.

Abstract:

This thesis finds a solution for control of ceiling radiant heating in the multilevel university building of ČVUT in Prague – Dejvice. The building is divided into several independent building blocks. The respective building blocks have got mutually separated circuits. The goal of the theoretical and practical part of the thesis was to design a model predictive controller (MPC). To design the controller, it was necessary to analyze all records of the previous heating activity. From this analysis, suitable failure-free sections with adequate length were selected. Possible methods of heating control were studied and a model based on Subspace identification methods was identified. Based on said model, the MPC controller was designed. The MPC controller uses a quadratic optimality criterion and a finite prediction horizon. Everything was implemented on the Scilab platform and tested on an industrial computer. The tests did not display any serious problem. The system is operable and suitable for the heating control of the university building.

Obsah

1 Úvod	6
1.1 Důvody vzniku a cíle práce	6
1.2 Postup a řešení problému	7
2 Prostředí Scilab	8
2.1 Informace o Scilabu	8
2.2 Výhody prostředí Scilab	8
3 Běžně používané způsoby řízení otopných soustav	10
3.1 Rozdělení	10
3.2 Popis jednotlivých typů regulace	11
3.2.1 Regulace podle teploty výstupní vody ze zdroje	11
3.2.2 Regulace podle vnitřní teploty	11
3.2.3 Regulace podle venkovní teploty – ekvitermní regulace	11
3.2.3.1 Čistě ekvitermní regulace	11
3.2.3.2 Ekvitermní regulace se zpětnou vazbou na vnitřní teplotu	12
3.2.4 Regulace podle zátěže	13
4 Popis systému a původního řízení	15
4.1 Informace o budově	15
4.2 Hydraulické zapojení	16
4.3 Elektrické prvky a řídicí část	18
5 Identifikace	20
5.1 Analýza dat	20
5.1.1 Dostupná data a jejich konverze	20
5.1.2 Úprava dat	20
5.2 Subspace identifikace	22

5.2.1	Popis Subspace	22
5.2.2	Postup identifikace	22
5.2.3	Výsledky identifikace	23
6	Prediktivní regulátor (MPC)	25
6.1	Obecný princip MPC	25
6.2	Návrh MPC	28
6.3	Implementace	29
6.4	Dosažené výsledky zjištěné simulací	31
7	Testování na reálném systému	32
7.1	Použité zařízení	32
7.2	Průběh testování	32
7.3	Výsledky testování	33
8	Závěr	35
8.1	Shrnutí	35
8.2	Další kroky	35
8.3	Poděkování	36
	Literatura	37
	Příloha A: Zdrojový kód implementace prediktivního regulátoru	38
	Příloha B: Zdrojový kód funkce pro výběr vhodného úseku dat	42

Kapitola 1

Úvod

1.1 Důvody vzniku a cíle práce

O vytápění budov se zajímám již od doby, kdy jsem navštěvoval základní školu. Zájem o tento technický směr by se nechal nazvat snad i rodinnou tradicí, jelikož mnohé převážně praktické zkušenosti mi předal a stále předává můj otec. Proč jsem se rozhodl pro diplomovou práci v oboru vytápění je asi každému jasné, ale jak jsem se k tomuto problému dostal? To je jednoduché, oslovil jsem Lukáše Ferkla, který mi toto téma nabídl. Po hlubším hloubání a sbírání informací jsem zjistil, že jde o řízení stropního vytápění budovy Českého vysokého učení technického v Praze. V tu chvíli jsem značně znejistěl, jelikož jsem tuto budovu navštěvoval mnohdy i několikrát denně a při představě, že mám řídit takovýto komplex, mi naskakovala husí kůže. Nicméně i přes menší nejistotu jsem se rozhodl vydat se vstříc neznámému dobrodružství.

V budově již je nasazeno řízení vytápění společnosti Energocentrum Plus, s.r.o., pracující na principu ekvitermní regulace s časovým programem. Chod regulace je optimalizován ručním upravováním žádané teploty topné vody podle předpovědi počasí na několik dní dopředu. Korekci teploty provádí velmi zkušený člověk s několikaletými zkušenostmi a výborným přehledem o budově. Tento řídicí systém ukládá naměřená data z provozu, což jsou pro nás stěžejní informace o chování systému.

Cílem této práce je navrhnout řízení vytápění budovy pomocí moderního regulátoru a ověřit jeho funkčnost v praxi. Hlavním požadavkem na řešený problém je minimalizovat finanční ztráty způsobené zbytečným přetápěním budovy a zároveň zajistit co nejlepší tepelný komfort při využívání budovy. Budova tedy musí být vytápěna na požadovanou komfortní teplotu pouze v období, kdy je

využívána. V době, kdy budova využívána nebude, je možné teplotu snížit a docílit tím snížení tepelných ztrát. Veškeré výpočty a práce s daty bude prováděna ve volně šiřitelném prostředí Scilab. Hlavním důvodem výběru je kompatibilita s již používaným zařízením Energocontra.

1.2 Postup a řešení problému

Celý problém je řešen pomocí prediktivního regulátoru (MPC). Prediktivní regulátor počítá akční zásahy na základě znalosti modelu soustavy, aktuálního stavu a budoucích průběhů žádaných (i předvídaných) hodnot proměnných. Model soustavy je vlastně matematický popis chování budovy. V našem případě jde o model s více vstupy a jedním výstupem. Identifikace takového modelu je provedena statistickými metodami, které na základě měřených dat určí dynamiku systému. Práce Bc. Jirky Mikoláška [11] se podrobně zabývá Subspace identifikací této soustavy. Nicméně i zde uvedu základní popis této metody, jelikož bylo nezbytné identifikování a zkoumání modelů přímo ve spojení s MPC. Správná funkce prediktivního regulátoru je velmi závislá na kvalitě a správném výběru modelu.

Jednotlivé kroky řešení:

- Analýza dostupných dat z dosavadního běhu systému
- Vytvoření matematického modelu systému pomocí Subspace identifikace
- Návrh prediktivního regulátoru (MPC)
- Nasazení a otestování navrženého regulátoru v reálné aplikaci

Kapitola 2

Prostředí Scilab

2.1 Informace o Scilabu

Scilab¹ je volně šiřitelný program pro numerické výpočty podobný výpočetnímu systému MATLAB. Program byl vytvořen francouzskými vědeckými institucemi INRIA a ENPC. Jeho licence umožňuje bezplatné používání, ale nespĺňuje podmínky Open Source Initiative ani Free Software Foundation. Program umožňuje provádět jak jednoduchou aritmetiku (násobení čísel), tak náročné výpočty. Scilab je například používán pro statistické analýzy, zpracování obrazu, simulace fyzikálních a chemických jevů.

2.2 Výhody prostředí Scilab

Prostředí Scilab je velmi podobné často používanému prostředí Matlab, nicméně prostředí Scilab má několik zásadních výhod, které vedly k využití právě prostředí Scilab místo Matlabu. Mezi tyto výhody lze zařadit:

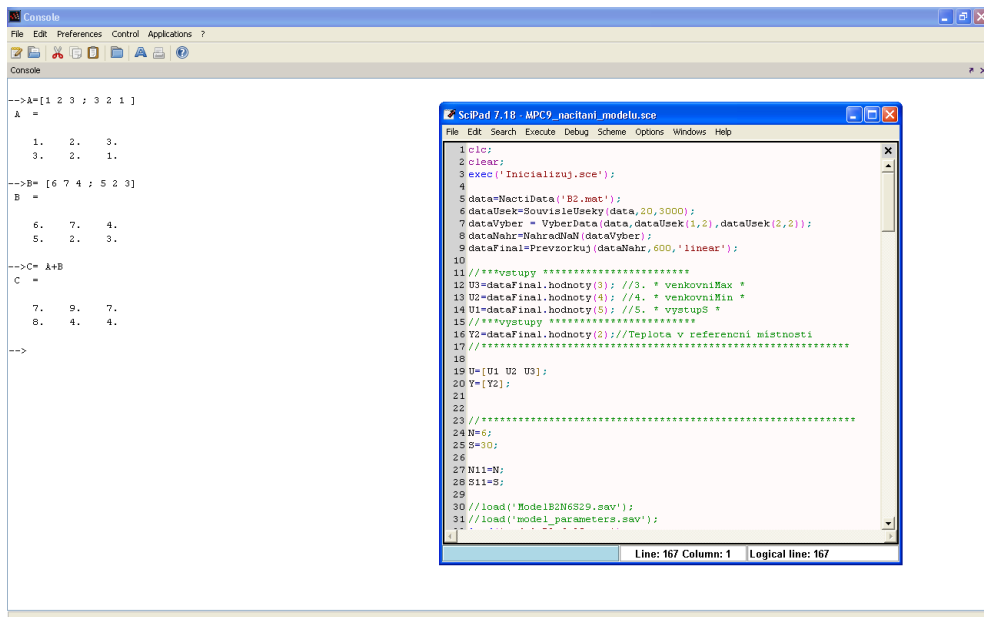
- Volně dostupná licence i pro komerční účely
Veškeré dostupné verze Scilabu včetně rozsáhlých knihoven jsou poskytovány zcela zdarma, a to i pro komerční účely. Využití prostředí Matlab by představovalo značné finanční nároky.
- Malá velikost potřebné paměti pro instalaci
Základní verzi lze instalovat na již 9MB volné paměti, což představuje značnou výhodu pro použití na mikroprocesorech používaných pro průmyslové

¹Scilab-5.1, INRIA, ENPC, 2009, <http://www.scilab.org>

aplikace. Pro tyto účely je dostupná knihovna instrukcí podporující kompilace pro konkrétní typy procesorů. Při jakýchkoliv problémech lze využít velmi dobrou podporu vývojového týmu.

- Lepší práce se Subspace identifikací

Subspace identifikace jsou mnohem rychlejší než v prostředí Matlab a zároveň jejich implementace poskytuje uživatelsky příjemnější přístup hlavně díky větší kontrole nad výpočty.



Obrázek 2.1: Ukázka programu Scilab

Kapitola 3

Běžně používané způsoby řízení otopných soustav

3.1 Rozdělení

V objektech lze obecně uplatnit různou regulaci tepelného příkonu. V [1] je popsáno následující rozdělení regulace otopných soustav:

1. Regulace podle teploty výstupní vody ze zdroje.
2. Regulace podle 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. směřováním) a zdroj tepla je regulován samostatně
 - (c) místně, kdy je regulován výkon jednotlivých otopných těles a zdroj tepla je regulován opět samostatně
3. Regulace podle venkovní teploty – 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; zdroj tepla je regulován samostatně
4. Regulace podle zátěže – dodávka tepla odpovídá jeho předpokládané spotřebě.

3.2 Popis jednotlivých typů regulace

3.2.1 Regulace podle teploty výstupní vody ze zdroje

Je to nejjednodušší forma regulace teploty přívodní vody, neboť je čidlo většinou i s regulátorem instalováno v přívodní trubce topné vody a podle této teploty ovládá zdroj tepla. Tento způsob regulace se používal dříve u zařízení s ručním nastavováním směšovače. Dnes se využívá pouze výjimečně, když kotel či kotle dodávají vodu do jednoho rozdělovače.

3.2.2 Regulace podle vnitřní teploty

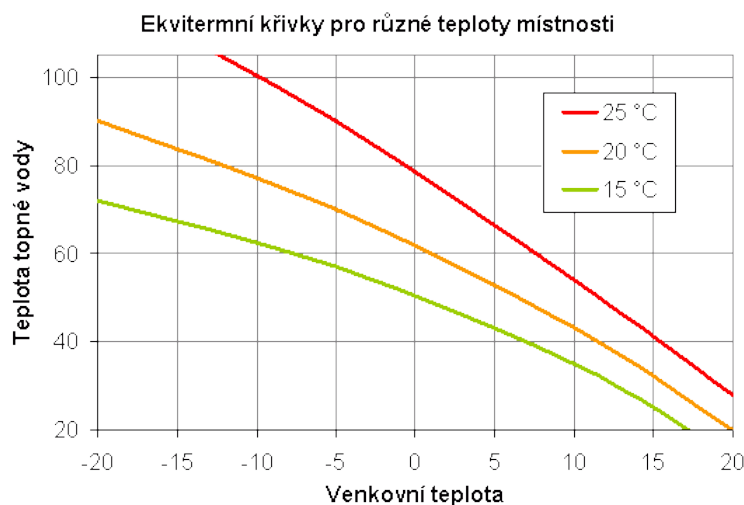
V tomto případě je snímána teplota vzduchu ve vytápěném prostoru a jako řízená veličina vysílána do regulátoru. Snímač je montován do referenční místnosti, podle které jsou ovládány i ostatní místnosti. Vzniklá regulační odchylka v referenční místnosti zapříčiní změnu teploty přívodní vody, čímž se začne vyrovnávat teplota i v ostatních místnostech, i když to v některých není nutné. Toto chování působí negativně u relativně velkých a rozlehlých objektů.

Uvedená regulace má stále dopravní zpoždění, které se musí udržovat co nejmenší, aby se zabránilo rozkmitání regulačního obvodu. Používají se regulátory s P a PI chováním, či dvoupolohové se zpětnou vazbou, eventuálně kaskádová regulace. Čidlo, většinou s ovladačem, musí být umístěno na místě, kde nebude ovlivněno místními zdroji tepla. Regulační systém může být výhodný při osazení termostatických regulačních ventilů. V referenční místnosti samozřejmě bez, jelikož by se oba systémy ovlivňovaly a stávaly se neúčinnými. Výhodou regulace podle vnitřní teploty vzduchu je rovněž chování při omezeném provozu otopné soustavy, jako je noční útlum. Teplota vzduchu je čidlem snímána a při volbě nočního provozu je omezena dodávka tepla až na sníženou vnitřní teplotu. Při dosažení nejnižší hraniční teploty se začne opět vytápět. Tím se zohlední tepelná kapacita budovy a zajistí se hospodárny provoz zařízení.

3.2.3 Regulace podle venkovní teploty – ekvitermní regulace

3.2.3.1 Čistě ekvitermní regulace

Tento způsob regulace se nazývá ekvitermní regulace. Potřeba tepla ve vytápěném objektu je závislá na venkovní teplotě. Na vnější fasádě umístěné čidlo předává elektronickou formou informaci regulátoru. Regulátor pracuje podle za-



Obrázek 3.1: Ekvitermní křivka

dané charakteristiky (ekvitermní křivky). Ukázka takové křivky je na obrázku 3.1. Křivka musí být nastavena v souladu se soustavou a objektem.

Na čem tedy závisí průběh této charakteristiky? Ve skutečnosti na projektovaném teplotním spádu na otopných tělesech (např. 75/65, 70/55, 55/45 °C, atd.), ale také na druhu otopné soustavy resp. otopné plochy (konvekční vytápění-otopná tělesa, sálavé vytápění-stropní, podlahové a stěnové) a tepelně technických vlastnostech vytápěného objektu. Regulátor reguluje pouze teplotu přívodní otopné vody v závislosti na venkovní teplotě vzduchu. Teplota zpětné vody se mění v závislosti na podmínkách, za kterých pracuje celá soustava. Regulace přívodní teploty je rychlá s malým dopravním zpožděním. Teplota přívodní vody se reguluje dvupolohově (řízení hořáku) nebo třípolohově (spolu s řízením trojcestné či čtyřcestné armatury). Tento princip regulace je hlavním základem většiny dnes používaných regulací.

3.2.3.2 Ekvitermní regulace se zpětnou vazbou na vnitřní teplotu

Jednou z modifikací je ekvitermní regulace se zpětnou vazbou na vnitřní teplotu. Vzhledem k vnitřním a vnějším tepelným ziskům vstupuje do ekvitermní regulace ještě zpětná vazba z prostoru. Nejedná se zde tedy o čisté ekvitermní regulaci, ale o ekvitermní regulaci se zpětnou vazbou na vnitřní teplotu. Regulátor měří aktuální teplotu v referenční místnosti (prostoru) a koriguje výše popsaný systém ekvitermní regulace.

Vliv teploty prostoru je možno rozdělit do dvou kategorií, a to:

- Dlouhodobý – regulace na základě zpětné vazby z prostoru dokáže přizpůsobit (adaptovat) odhadem zadanou otopnou křivku vlastnostem vytápěného objektu (změna strmosti otopné křivky a paralelní posun). Tudíž se zde jedná o adaptivní regulaci.
- Krátkodobý – na základě zjištěné teplotní odchylky v prostoru regulátor účelově koriguje žádanou prostorovou teplotu.

Říká se, že ekvitermní regulace zabezpečuje rovnováhu mezi výrobou a spotřebou tepla. Je to skutečně pravda, avšak tato rovnováha je závislá na určitém předpokladu, který se nazývá vyladěná otopná křivka. To je jeden z důvodů vyšších úspor. Další důvod je ten, že se vyrobí teplo pouze o potřebné kvalitě (teplota otopné vody). Požadavky na teplotu otopné vody vždy směřují od spotřeby tepla (otopná křivka a vliv teploty v prostoru) ke zdroji tepla (kotel). Je to z toho důvodu, abychom mohli nezávisle řídit více otopných okruhů, které mají různý odběr tepla v čase a potažmo jiné požadavky. Kotel připravuje vodu podle nejvyššího požadavku spotřebitele a ještě s určitým navýšením, které je nutné z hlediska dalšího směřování.

3.2.4 Regulace podle zátěže

Regulace podle zátěže představuje řízení teploty vody v závislosti na potřebě tepla, a to bez použití venkovního nebo prostorového čidla teploty. Snímá se teplota výstupní kotlové vody (spolupracuje tak i kotlový termostat) a mapuje se doba chodu hořáku v časové periodě. S rostoucí kvalitou budov (lepšími tepelně technickými vlastnostmi) má venkovní teplota na skutečnou potřebu tepla stále menší vliv. Řízení zátěží a řízení podle potřeby tepla jsou koncepčně zcela shodné. Řešení vycházejí z tvorby křivky zátěže či křivky potřeby tepla. Požadovaná teplota kotlové vody či teplota vody přiváděné do soustavy je řízena podle křivek zátěže. Výhodou tohoto řízení je rychlá odezva na potřebu tepla u dobře tepelně izolovaných budov, produkce pouze aktuálně potřebného množství tepla a zohlednění cizích zdrojů tepla (tepelných zisků). Za nevýhodu bychom pak mohli považovat nutnost použití místní regulace (např. termoregulační ventil).

Řízení zátěží je tedy smysluplné využít za předpokladu, že se jedná o:

- dobře tepelně izolované stavby
- jednostupňový hořák u zdroje tepla
- přímo připojený otopný okruh

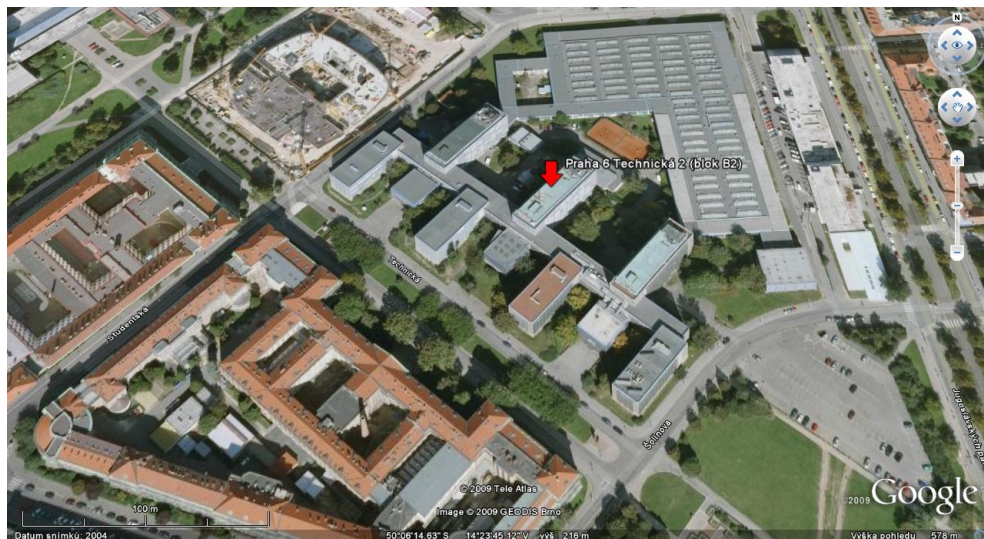
- užití termoregulačních ventilů
- instalaci bez venkovních a vnitřních čidel
- rozumné chování spotřebitele (žádné permanentní přenastavování regulátoru, tj. termostatické hlavice u termoregulačních ventilů)
- snahu využít tepelných zisků (všech cizích zdrojů tepla)

Kapitola 4

Popis systému a původního řízení

4.1 Informace o budově

Budova se nachází v Praze v Technické ulici č.p. 2. Fotografie budovy je znázorněna na obrázku 4.1. Snímek je pořízen pomocí aplikace Google Earth¹. Jde o školní budovu ČVUT v Praze. Budova je rozdělenou na několik samostatných bloků. Naše studie pracuje s daty z bloku B2.



Obrázek 4.1: Fotografie budovy

Teplovodní systém „Crittall“, který je použit na budově Fakulty strojní a Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze – Dejvicích, byl podle [13] patentován britským profesorem Arthurem H. Bakerem v roce 1907. V roce 1909 jej od něj koupila firma Crittall (zal. 1884), které jej dále vyvíjela, viz např. patentované vylep-

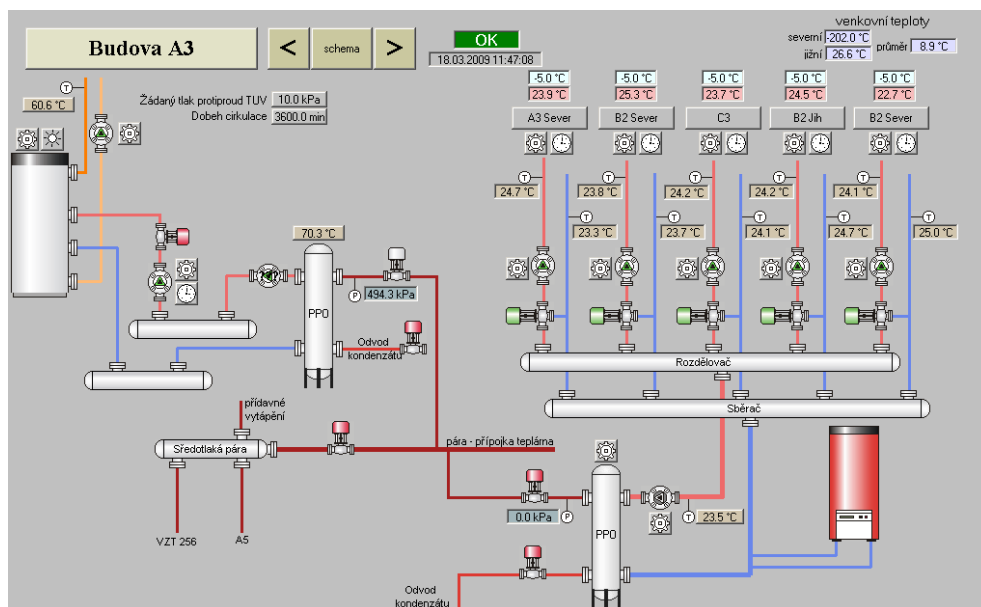
¹<http://earth.google.com>

šení podané R. G. Crittallem a J. L. Musgravem [3]. Systém byl ve Velké Británii populární kolem první světové války, ale opravdového celosvětového rozmachu dosáhl až po druhé světové válce, částečně zásluhou slavného amerického architekta Franka Lloyda Wrighta. Systém se používal také v Československu, v případě budovy ČVUT se jedná konkrétně o topný (resp. chladicí) had z kovových trubek zabudovaný v monolitickém betonovém stropě.

V případě budovy ČVUT je individuální regulace tohoto systému zcela nemožná. Regulace se proto provádí centrálně vždy pro jednotlivé bloky budovy. Sálavý systém vytápění (ale i chlazení) s akumulací hmotou je obecně obtížné regulovat. Umístění ve stropě není vhodné ani z důvodu přirozeného rozvrstvení vzduchu (teplý nahoře a studený dole). Dodávka tepla pro vytápění je zajištěna parním rozvodem z centrální výtopny.

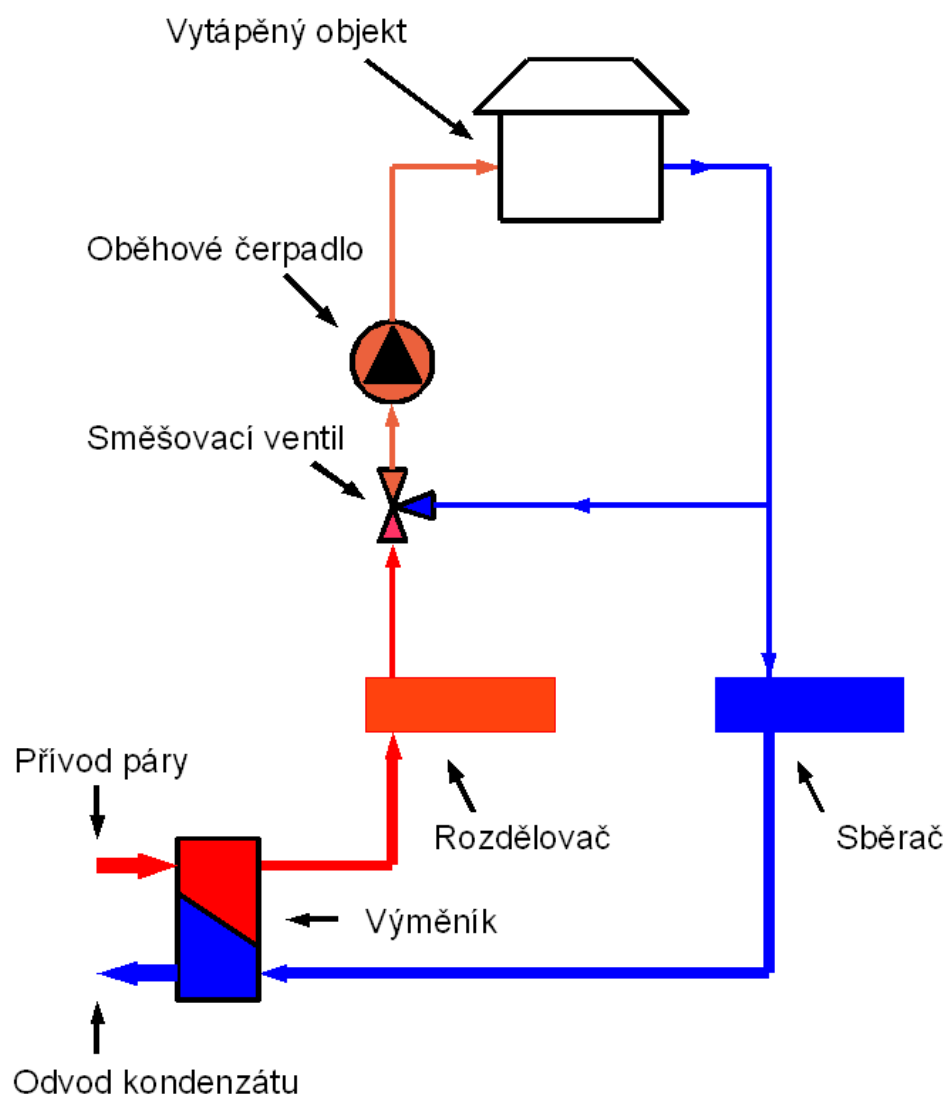
4.2 Hydraulické zapojení

Horká pára předává teplo v parním výměníku a ohřívá sekundární vodu na konstantní teplotu. Jde o výměník pára-teplá voda. Teplota výstupní vody z výměníku je díky regulaci vstupní páry udržována běžně na 50 °C. Voda je dále přiváděna do rozdělovače, který dodává teplou vodu pro jednotlivé topné okruhy.



Obrázek 4.3: Schema kotelný v SCADA rozhraní

Každý samostatný okruh je vybaven trojcestným směšovací ventilem se servopohonem. Teplota topné vody je určena poměrem teplé vody z rozdělovače a



Obrázek 4.2: Hydraulické schéma

vracející se ochlazené vody z topného okruhu. Poměr mísení je nastaven polohou trojcestného ventilu. Pokud je ventil plně otevřen, je do topného okruhu vháněna pouze teplá voda z rozdělovače. Pokud je ventil zavřen, není do topného okruhu vháněna žádná teplá voda z rozdělovače. Při zavřeném ventilu okruhem cirkuluje stále stejná voda bez jakéhokoliv ohřívání. Na obrázku 4.3 je naznačeno propojení jednotlivých prvků.

4.3 Elektrické prvky a řídicí část

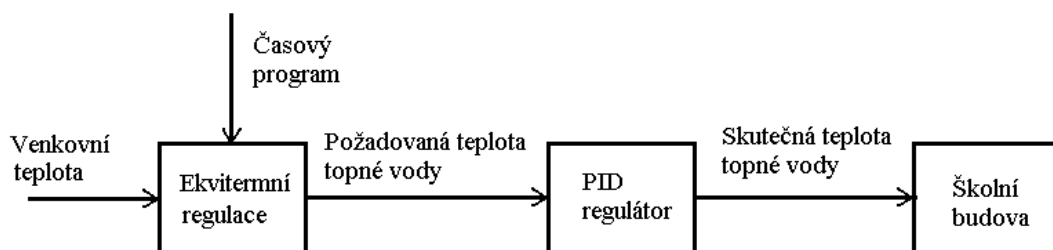
Údaje o teplotách jsou měřeny pomocí průmyslových čidel Sensit Ni 1000. Veškeré hodnoty jsou periodicky snímány a ukládány do databáze.



Obrázek 4.4: Rozdělovač se směřováním jednotlivých topných okruhů

Trojcestné směšovací ventily jednotlivých větví jsou poháněny servopohony Belimo. Poloha ventilu je úměrná napětíovému signálu, kterým je ventil řízen. Cirkulaci teplé vody zajišťují elektrická čerpadla značky Grundfos. Ovládání veškerých komponentů je naprogramováno pomocí RcWare. RcWare je balík programů pro řízení, vizualizaci a vyhodnocování technologických procesů vyvinutý firmou Energocentrum Plus, s.r.o. Samotný regulační algoritmus je postaven na PID regulátoru. Požadavek pro PID regulátor je udáván ekvitermní křivkou,

kteřá je doplněna časovým programem jak naznačuje na obrázku 4.5. Funkce regulace je závislá na ručním doladování podle předpovědi venkovních teplot.



Obrázek 4.5: Blokové schéma regulace pomocí RcWare

Předpovědi teplot jsou získávány z volně dostupných dat NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)². Tyto předpovědi jsou dlouhodobě sledovány, čímž je ověřena jejich dostatečná přesnost. Díky těmto zkušenostem je možné jejich využití i při návrhu a později i chodu prediktivního regulátoru. Bezplatné získávání předpovědí tohoto typu je značně problematické, jelikož jde většinou o komerční záměr společností.

²<http://www.noaa.gov>

Kapitola 5

Identifikace

5.1 Analýza dat

5.1.1 Dostupná data a jejich konverze

Naměřené hodnoty z dosavadního běhu systému jsme obdrželi ve formátu *.csv. Hodnoty byly ukládány v třiminutovém intervalu (perioda vzorkování). Prvním krokem bylo převedení dat na formát čitelný pro prostředí Scilab. Navenek jednoduchý úkol se neobešel bez pomoci výpočetního programu Matlab¹, do kterého bylo nutné data importovat a poté uložit ve formátu *.mat. Scilab již Matlabem uložená data načetl pomocí funkce `loadmatfile()`. Z množství dostupných dat byla vybrána pouze potřebná, a to:

- venkovní teplota
- předpovídaná minimální a maximální venkovní teplota
- vnitřní teplota v budově
- teplota topné vody do okruhu

5.1.2 Úprava dat

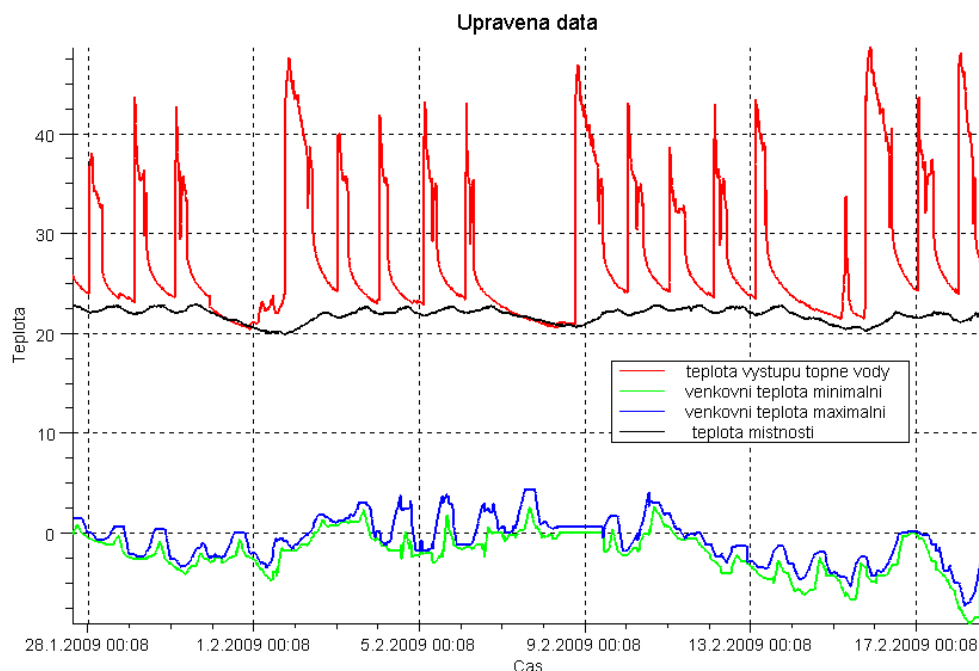
V datech se vyskytovaly drobné výpadky a neúplné záznamy. Bylo tedy nutné vybrat úseky, které neobsahovaly příliš dlouhé výpadky. Pro pohodlnější práci s daty jsem vytvořil několik skriptů v prostředí Scilab, které data snadno upraví do patřičné formy. Výpis hlavních informací o datech je v tabulce 5.1. Z dat byly

¹Matlab 7.5.0, The MathWorks, Inc., 2009, <http://www.mathworks.com>

Pořadí	Začátek úseku	Konec úseku	Počet vzorků	Počet dní
1	2008 12.12. 0:18:32	2008 29.12. 7:32:59	4152	17.3
2	2009 13. 1. 12:46:10	2009 22. 1. 21:20:59	4480	9.4
3	2009 27. 1. 15:38:56	2009 18. 2. 14:12:13	10526	21.9
4	2009 21. 2. 20:46:20	2009 3. 3. 16:35:59	4712	9.8
5	2009 10. 3. 14:13:55	2009 19. 3. 15:53:59	4343	9.1

Tabulka 5.1: Úseky dat s výpadkem menším než 20 min. a počtem vzorků větším než 3000

vybrány souvislé úseky s výpadkem menším než 20 minut a počtem vzorků více jak 3000. Nejdelší souvislý úsek (v tabulce uveden jako třetí) byl použit pro identifikaci systému. Pro řízení jsem zvolil periodu vzorkování 10 minut, což je pro úlohu vytápění budovy s velikou setrvačností dostačující. Data jsem tedy převzorkoval a snížil tak množství dat a později i periodu výpočtů akčního zásahu regulátorem.



Obrázek 5.1: Ukázka průběhů vybraných a upravených dat

5.2 Subspace identifikace

5.2.1 Popis Subspace

Studie Subspace identifikace není předmětem této práce, nicméně její užití je nedílnou (popřípadě jiná metoda identifikace) součástí návrhu MPC regulátoru. Z hlediska praktického využití této metody zde uvedu stručný popis vycházející převážně z [15]. Není zde cílem podrobná studie této metody, ale pouze stručné vysvětlení praktického využití.

Metody Subspace identifikace (občas zkracované 4SID – Subspace State-Space System Identification) jsou v poslední době velmi populární díky tomu, že poskytují velmi výkonný nástroj pro identifikaci systémů. Jde o metody pro identifikaci parametrů lineárních stavových modelů z experimentálních vstupně-výstupních dat, poskytují tedy alternativu k OEM, ARX či ARMAX modelům a identifikacím založených na MS (mean square, nejmenší čtverce) a ML (maximum likelihood, maximální věrohodnost) odhadech. Vycházejí ze standardního stavového modelu se šumem

$$x(k+1) = Ax(k) + B\tilde{u}(k) + f(k) \quad \text{pro } k \geq 0; x(k) \in R^n \quad (5.1)$$

$$y(k) = Cx(k) + D\tilde{u}(k) + v(k) \quad \tilde{u}(k) \in R^m; y(k) \in R \quad (5.2)$$

$$u(k) = \tilde{u}(k) + w(k) \quad (5.3)$$

kde x je stav systému, u , y jsou vstup a výstup, A , B , C , D jsou matice systému a f , v a w jsou šумы (korelované, ergodické, bílé s nulovou střední hodnotou).

Výhody Subspace metod jsou podle [18] hlavně následující:

- Stejná složitost identifikace pro SISO a MIMO systémy
- Malý počet uživatelem nastavovaných parametrů
- Schopnost odhadu řádu systému
- Numericky robustní implementace (SVD, QR faktorizace)
- Implicitní redukce řádu modelu

5.2.2 Postup identifikace

Podrobnou studií identifikace tohoto systému se zabývá práce [11], která vznikla souběžně s touto prací. Jelikož jsem se s praktickým použitím identifikace zao-

bíral i já, zmíním se o ní i zde. Identifikaci systému jsme prováděli v prostředí Scilab, které má pro Subspace identifikaci k dispozici celou knihovnu „Identification“. Subspace identifikace jsou vcelku uživatelsky přístupné. Nepožadují příliš vstupních informací. V zásadě jsou potřeba pouze údaje:

- Vstupní a výstupní data u, y
- Řád systému N (ten je možné odhadnout automaticky, ale je možné ho i pevně zadat)
- Počet řádkových bloků S blokových Hankelových matic, ze kterých se počítá řešení

Vstupní a výstupní data u, y mohou být zatížena bílým, ergodickým, vzájemně korelovaným bílým šumem. Lepších výsledků identifikace se dosáhne, pokud jsou vstupně – výstupní data dostatečně „pestrá“ (tj. systém má dostatečně vybuzené všechny módy). To se v případě identifikace budovy příliš ovlivnit nedá a musíme se tedy spokojit pouze s dostupnými daty. Řád systému N může vyplynout přímo z identifikačního procesu, ale je možné jej i přímo zadat. Subspace metody přitom nejsou zdaleka tak citlivé na jeho odhad jako identifikace ARX či ARMAX modelů (ML a LS odhady). Počet řádkových bloků S blokových Hankelových matic udává konstrukci vnitřních matic Subspace metod, z jejichž podprostorů se potom počítají parametry stavového modelu identifikovaného systému (odtud název Subspace). Tímto parametrem vlastně celou identifikaci ladíme. Volání identifikace ve Scilabu je následující ukázky kódu:

```
[R, N] = findR(S, y, u);  
model = findABCD(S, N, 1, R);  
model.X0 = inistate(model, y, u);
```

V prvním kroku získáme horní trojúhelníkovou matici R složených blokově-diagonálních Hankelových matic a odhad řádu systému N . Ve druhém kroku identifikujeme model (musíme mu říci, že systém má 1 výstup), ve třetím kroku potom počáteční stav x_0 .

5.2.3 Výsledky identifikace

Pro určení kvality modelu byly brány v úvahu následující vlastnosti:

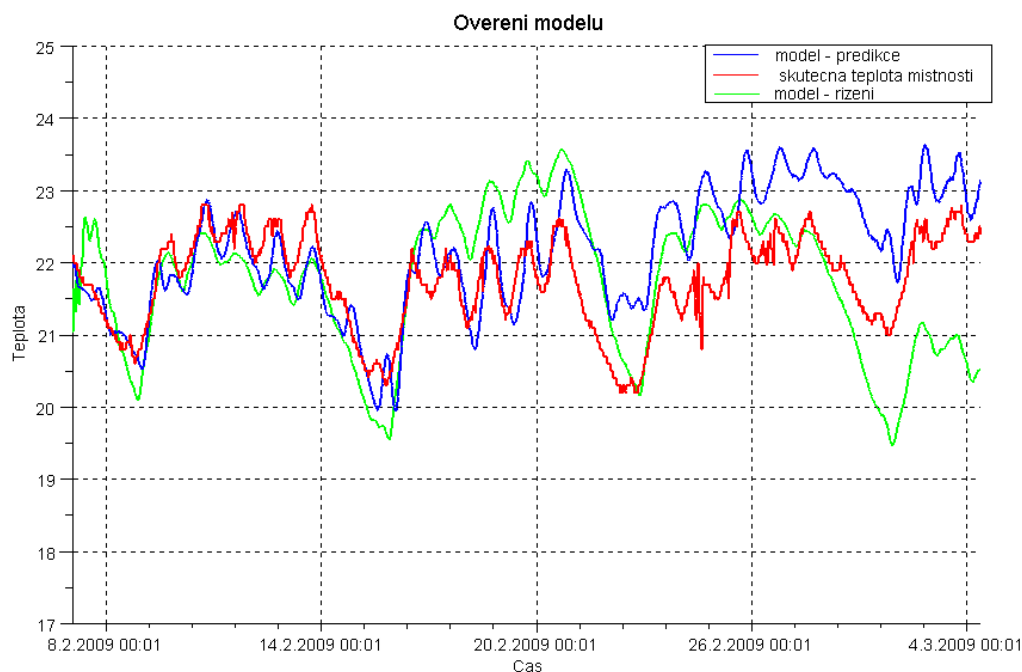
1. Medián relativních chyb mezi výstupem modelu a naměřeným reálným výstupem pro stejná vstupní data

2. Schopnost predikce modelu

3. Velikost řádu systému

Jako první krok jsem provedl hrubý výběr asi 20 modelů s nejmenší relativní chybou. Řády modelů N jsou od 1 do 13. Hodnoty S , ze kterých jsem vybíral modely, leží v rozmezí od 20 do 100. Při automatickém odhadu řádu byl ve všech případech zvolen řád první, bylo tedy nutné zadávat řád pevně. Při nižších řádech modelů se většinou vyskytoval jen jeden samotný model pro konkrétní hodnotu S . Při vyšších řádech většinou vyhovovala skupinka modelů s velmi blízkými hodnotami S . Pro vyšší řády také docházelo k nechtěné identifikaci šumu, který se v měřených datech nacházel.

Později se ukázalo, že výběr modelu podle shodnosti odezvy nebyl vůbec klíčový. Většina modelů, které byly vybrány předchozím postupem, se ve spojení s MPC rozkmitaly a byly nepoužitelné. Nezbytné bylo tedy vybírat model podle chování přímo ve spojení s MPC, což představovalo značnou pracnost. Z velkého množství modelů se nakonec podařilo vybrat model s parametry $N = 6$ a $S = 25$, který se choval při ověřování nejlépe. Odezvu tohoto modelu vidíme na obrázku 5.2.



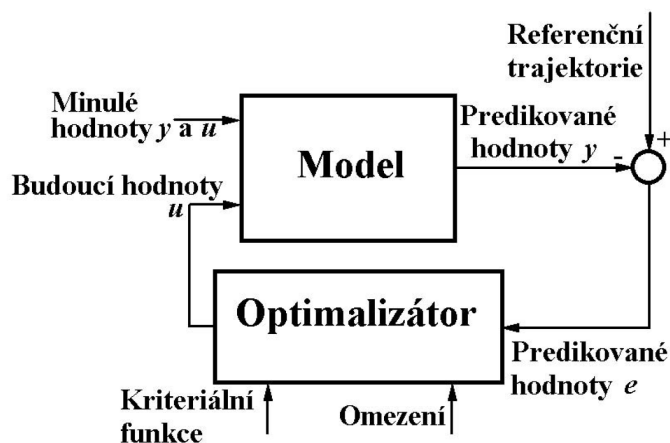
Obrázek 5.2: Odezva modelu na reálná vstupní data

Kapitola 6

Prediktivní regulátor (MPC)

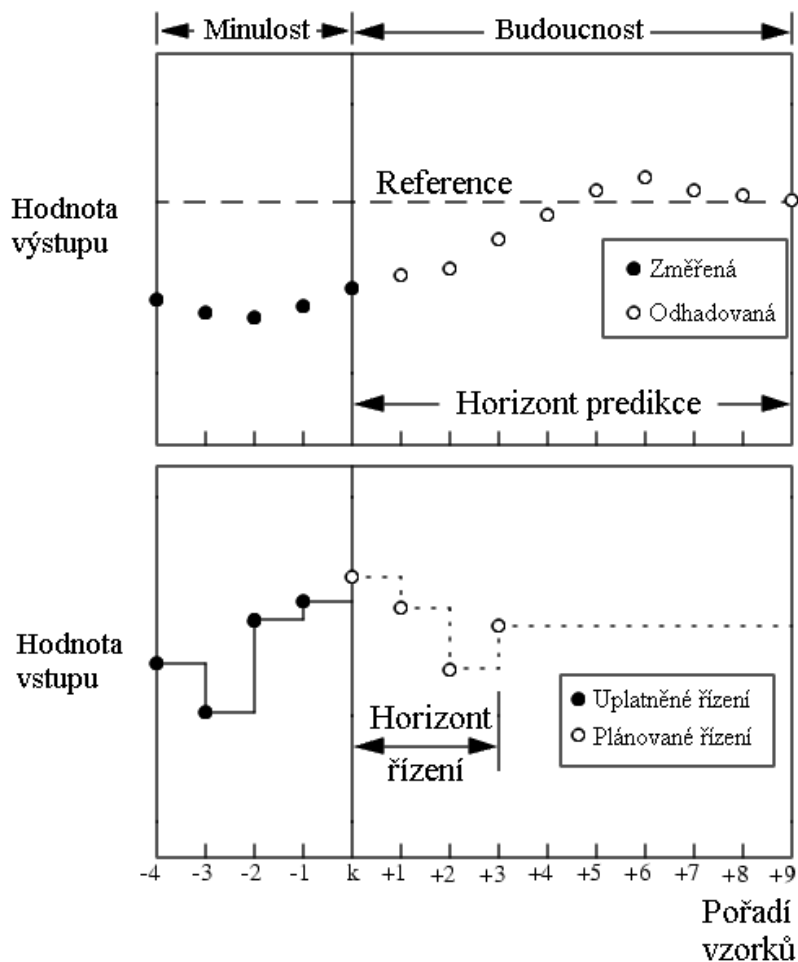
6.1 Obecný princip MPC

Pokročilé metody řízení jsou vyvíjeny již několik desítek let. Za průlomovou metodu v této oblasti lze bezesporu považovat prediktivní řízení. Jde o metodu v současné době značně populární. V úloze prediktivního řízení je třeba řešit optimalizační problém on-line, což může být z numerického hlediska obtížné. Stále širší uplatnění prediktivního řízení v průmyslových podmínkách je umožněno velkým výpočetním výkonem současných počítačů.



Obrázek 6.1: Schéma prediktivního regulátoru

Základní princip metody prediktivního řízení je ukázán na obrázku 6.1. Strategie prediktivního řízení je taková, že se nehledá pouze akční zásah pro následující periodu vzorkování jako u jiných metod, ale hledá se celá optimální posloupnost (naznačeno na obrázku 6.2) zásahů pro daný horizont predikce, a to na



Obrázek 6.2: Princip prediktivního řízení

základě modelu procesu.

Model procesu je použit pro predikci jeho chování a je identifikován z dat naměřených v průběhu identifikačního experimentu. Je třeba poznamenat, že při použití metody prediktivního řízení se nelze obejít bez dostatečně přesného modelu řízeného procesu. Na základě modelu se počítá budoucí předpokládaný průběh jednotlivých veličin a z těchto predikovaných budoucích trajektorií se řešením optimalizační úlohy stanovuje optimální hodnota řídicího signálu (akční zásah). Posloupnost akčních zásahů je vypočítána tak, aby zůstala zachována všechna uvažovaná omezení platná pro jednotlivé veličiny procesu.

Nalezená optimální posloupnost akčních zásahů by mohla být postupně použita v časovém intervalu daném horizontem predikce. Po zavedení všech vypočítaných akčních zásahů pro celý daný časový interval by se našla nová posloup-

nost. Takový přístup však není praktický. Představuje řízení v otevřené smyčce, kdy nemohou být brány v úvahu, a tedy ani eliminovány poruchové veličiny působící na systém v jednotlivých periodách vzorkování. Tento nedostatek je odstraněn zavedením zpětné vazby prostřednictvím klouzavého horizontu. Při použití klouzavého horizontu se z celé vypočítané optimální posloupnosti použije pouze první akční zásah a v následující periodě vzorkování se na základě nového měření vypočítá nová posloupnost. Takto je do řízení zavedena zpětná vazba.

Již několikrát bylo zmíněno, že algoritmus prediktivního řízení hledá optimální posloupnost akčních zásahů, a proto je nutné formulovat kritérium optimality, které definuje cíle pro prediktivní regulátor. Jádrem algoritmu prediktivního řízení je řešení optimalizační úlohy s daným kritériem optimality a modelem procesu. Kritéria optimality jsou volena podle konkrétní řešené úlohy. V průmyslu to typicky bývá požadavek na maximalizaci objemu výroby a zisku, minimalizaci vstupních nákladů, minimalizaci množství vedlejších produktů apod. Tyto požadavky se formulují matematicky a celá optimalizační úloha má tento standardní tvar

$$u^* = \arg \min_u J(u|x) : \begin{cases} g(u|x) \leq 0 \\ h(u|x) = 0 \end{cases} \quad (6.1)$$

kde u^* je hledaná optimální posloupnost hodnot řídicího signálu, $J(u|x)$ obecně nelineární ztrátová funkce vyjadřující požadavky na řízení, x vektor hodnot měřených veličin a $g(u|x)$ a $h(u|x)$ jsou obecně nelineární funkce vyjadřující omezení platná pro jednotlivé veličiny procesu.

Další typickou vlastností prediktivního regulátoru je, že může efektivně pracovat s měřitelnými poruchami (veličiny, které ovlivňují proces, ale nemohou být řízeny), jako je např. teplota v okolí procesu. Na hodnoty těchto veličin se bere zřetel při výpočtu optimálního akčního zásahu.

Ve velmi mnoha případech v průmyslu však postačuje lineární model procesu, který je schopen vystihnout jeho chování v dané pracovní oblasti s dostatečnou přesností. Poznamenejme, že jako lineární model mohou být použity např. impulsní nebo přechodová charakteristika, přenosová funkce nebo stavový popis systému. Obtížně řešitelná obecná nelineární optimalizační úloha pak dostane tvar úlohy lineárního nebo častěji kvadratického programování, pro jejichž řešení existují velmi efektivní algoritmy.

6.2 Návrh MPC

Pro matematický model soustavy

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (6.2)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) \quad (6.3)$$

hledáme řídicí posloupnost $u(k)$ na horizontu predikce T_P minimalizující kvadratické kritérium

$$J = \sum_{k=0}^{T_P-1} \{ (y(k) - r(k))^T Q (y(k) - r(k)) - u(k)^T R u(k) \} \quad (6.4)$$

kde $r(k)$ je posloupnost žádaných hodnot výstupu. Matice Q je váha regulační odchylky a matice R je váha řídicí veličiny. Obě váhové matice jsou symetrické.

Odezvu systému na horizontu predikce můžeme vyjádřit

$$\begin{bmatrix} y(k) \\ y(k+1) \\ y(k+2) \\ \vdots \\ y(k+T_P-1) \end{bmatrix} = Vx(k) + S \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ u(k+2) \\ \vdots \\ u(k+T_P-1) \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

$$V = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ A \\ \vdots \\ CA^{T_P-1} \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} D & 0 & 0 & 0 & 0 \\ CB & D & 0 & 0 & 0 \\ CAB & CB & D & 0 & 0 \\ \vdots & & & \ddots & \\ CAB^{T_P-2} & & & & D \end{bmatrix}$$

V řízení se objevují vstupy představující poruchové veličiny (disturbance variables), jejichž hodnoty jsou dopředně získávány pomocí předpovědí teplot, a vstupy představující akční veličinu (manipulated variables). Rozdělení vstupů podle rovnice (6.6) umožní výpočet řídicích veličin (u_{mv}), v našem případě tep-

lotu topné vody do okruhu, při známých poruchových veličinách (u_{dv}). Poruchové veličiny jsou v našem případě minimální a maximální venkovní teploty

$$\begin{bmatrix} y(k) \\ y(k+1) \\ y(k+2) \\ \vdots \\ y(k+T_P-1) \end{bmatrix} = Vx(k) + S \begin{bmatrix} u_{dv}(k) \\ u_{dv}(k+1) \\ u_{dv}(k+2) \\ \vdots \\ u_{dv}(k+T_P-1) \end{bmatrix} + S \begin{bmatrix} u_{mv}(k) \\ u_{mv}(k+1) \\ u_{mv}(k+2) \\ \vdots \\ u_{mv}(k+T_P-1) \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

Z důvodů zachování rozměrů matic mají obě matice vstupů stejnou délku. Nevyužité prvky jsou tedy nahrazeny nulovými hodnotami a platí

$$\begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ u(k+2) \\ \vdots \\ u(k+T_P-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{dv}(k) \\ u_{dv}(k+1) \\ u_{dv}(k+2) \\ \vdots \\ u_{dv}(k+T_P-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{mv}(k) \\ u_{mv}(k+1) \\ u_{mv}(k+2) \\ \vdots \\ u_{mv}(k+T_P-1) \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

6.3 Implementace

Jedna z možností implementace kvadratického řízení je pomocí kvadratického programu

$$\min_u \left\{ \frac{1}{2} u^T H u + f u \right\} : \begin{cases} A u < b \\ A_{eq} u = b_{eq} \end{cases} \quad (6.8)$$

kde hledáme takové u , které minimalizuje penalizační funkci $\frac{1}{2} u^T H u + f u$, kde $u^T H u$ je její kvadratická část (H je váhová matice) a $f u$ je její lineární část (f je váhový vektor). V našem případě platí

$$H = S' Q S + R \quad (6.9)$$

$$f = [r - (Vx + S u_p)] Q S \quad (6.10)$$

Kvadratický program má dále omezující podmínky na hledané u , které lze vyjádřit maticovými rovnicemi $A u \leq b$ (omezení typu nerovnost), $A_{eq} u = b_{eq}$ (omezení typu rovnost). Jak je vidět, do řízení je možné zadat i omezující podmínky (např. omezit řídicí nebo výstupní veličinu), což je značná výhoda oproti ostat-

ním lineárním regulátorům, jako jsou PID nebo LQG. Zápis ve Scilabu vypadá následovně:

```
[Up, l agr, info]=qp_solve(H, f, A, b, me);
```

Parametr m_e udává index prvku vektoru b , od kterého budou podmínky určeny ve tvaru rovnosti. Pomocí podmínek typu rovnosti je přiřazena nulová hodnota vstupům představujícím poruchy. Tyto poruchy jsou již zohledněny v popisu systému, a proto je zde nastavujeme na nulu a ne na požadovanou hodnotu. Podmínky typu nerovnosti omezují vypočítanou teplotu topné vody od 20 do 50 °C. Pořadí podmínek vycházející ze zadání pomocí m_e nesouhlasí s pořadím vycházejícím ze stavového popisu. Nezbytná byla tedy změna pořadí prvků matic předávaných solveru.

Pro provázanost stavu simulovaného modelu a reálné soustavy je použit Kalmanův filtr

$$e = y_{\text{měřená}} - y_{\text{model}} \quad (6.11)$$

$$x = x + Ke \quad (6.12)$$

kde e je rozdíl výstupu simulovaného a měřeného. Upřesnění stavů modelu podle měřených hodnot se provádí kladnou zpětnou vazbou přes matici K . Tuto matici lze získat ve Scilabu pomocí:

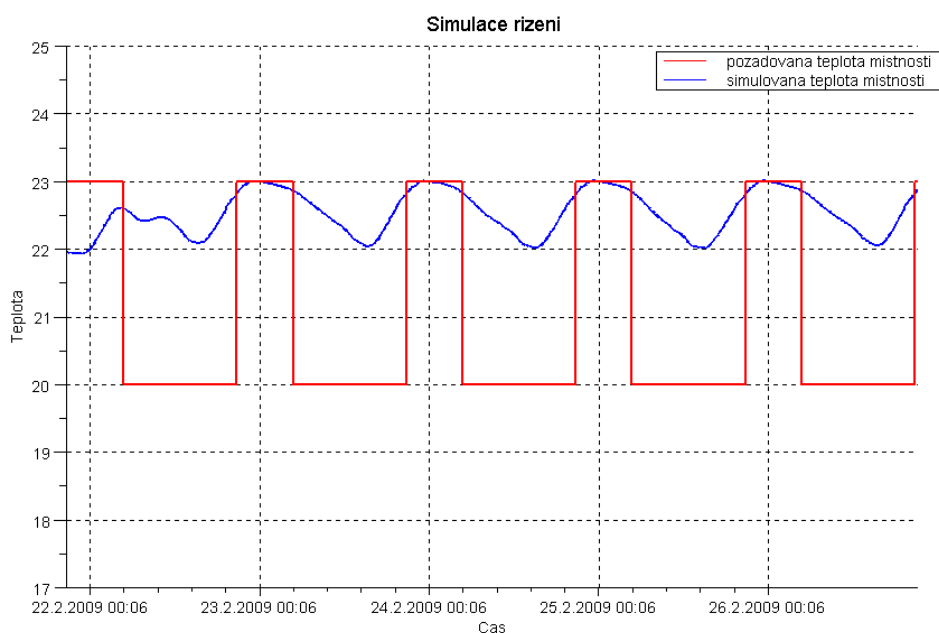
```
[B,D,K] = findBDK(S,N,1,R);
```

Použití Kalmanova filtru výrazně zpřesňuje model díky stálému dorovnávání stavů podle skutečné naměřené hodnoty výstupu systému.

Zajištění komfortní teploty v době využívání budovy je jeden z hlavních požadavků na řízení. Tento požadavek byl zohledněn pomocí proměnné matice Q (váha regulační odchylky), která se mění podle požadované reference na horizontu predikce. Vyskytuje-li se na horizontu predikce požadavek na komfortní teplotu, je kladen důraz na dodržení této teploty. Požadavek na útlumovou teplotu je velmi potlačen. Důraz na útlumovou teplotu je kladen pouze tehdy, klesne-li teplota v místnosti pod tuto hodnotu. Je tedy zaručeno sledování komfortní teploty v době využívání budovy a naopak možnost samovolného vychládání budovy v době, kdy není nutné topit.

6.4 Dosažené výsledky zjištěné simulací

MPC regulátor jsem naložil a odzkoušel na datech získaných od 22. 2. 2009 do 2. 3. 2009. Simulace byly prováděny na modelu bez šumu, tedy i bez Kalmanova filtru. Výsledné průběhy na obrázku 6.3 jsou pro nastavení $Q = 10^4$, $R = 1$ a $T_p = 90$, což odpovídá 15 hodinám při vzorkování 10 minut. Odchylka simulovaného průběhu od komfortní referenční teploty není větší než $0,2\text{ }^\circ\text{C}$, což splňuje požadavky na přesnost regulace. Takto navržený regulátor byl tedy vybrán (společně s modelem) pro testování na reálném systému.



Obrázek 6.3: Simulace řízení

Kapitola 7

Testování na reálném systému

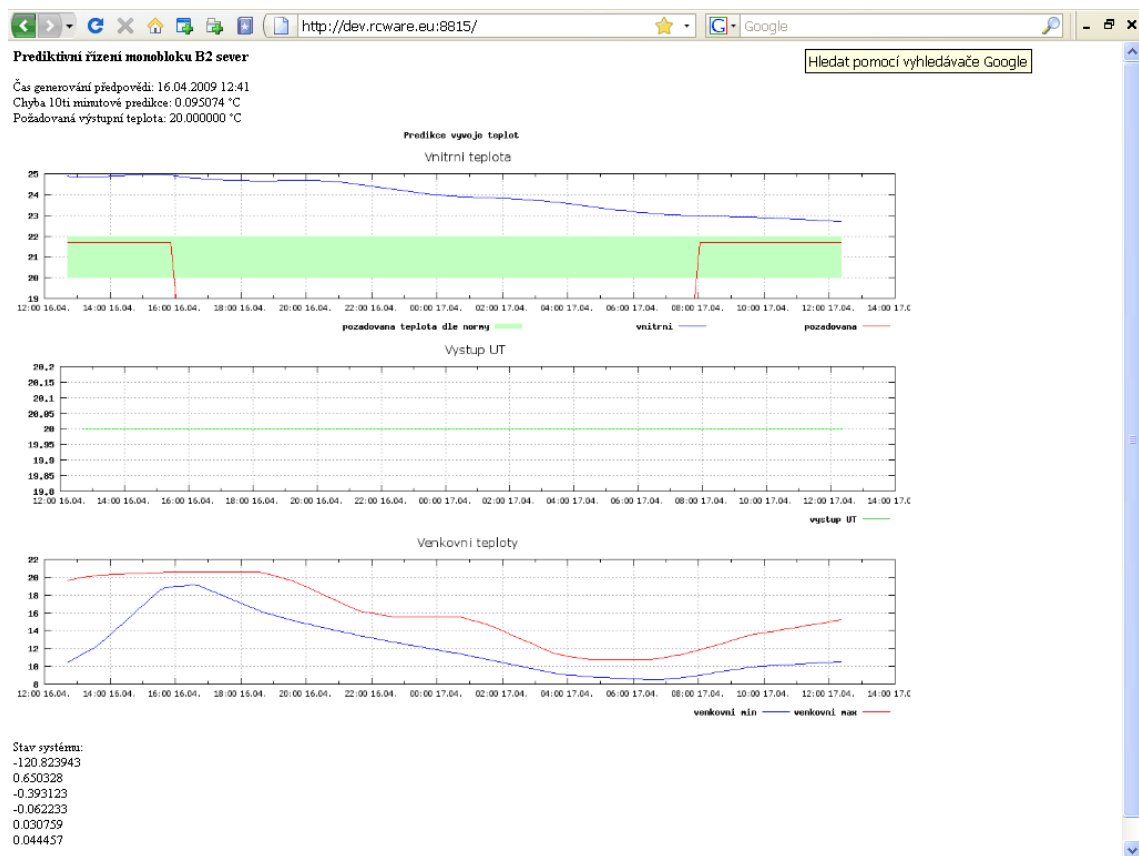
7.1 Použité zařízení

Přímo v kotelně je nainstalován průmyslový počítač s operačním systémem Linux, který je připojen do interní sítě. Tento počítač ovládá akční prvky (čerpadla, ventily, směšovací ventily). Aplikace s výpočtem akčního zásahu je spouštěna v desetiminutových intervalech na serveru umístěném mimo kotelnu. Na tomto serveru jsou dostupné veškeré potřebné informace o měřených, žádaných i předpovídaných teplotách. Server také zajišťuje zálohování veškerých dat, které jsou využívány pro vyhodnocení a případné zlepšování. Vypočítaná teplota topné vody je předána do počítače v kotelně. Trojcestný ventil udržující tuto teplotu na výstupu do topného okruhu je řízen pomocí PID regulátoru.

7.2 Průběh testování

Dne 25. 3. 2009 byla spuštěna první fáze testování. V této fázi bylo paralelně s dosavadním řízením spuštěno i řízení pomocí MPC. Akční zásah pomocí MPC byl pouze zaznamenáván, nikoliv využíván k řízení. Po dvoudenním provozu se ověřila stabilita systému a testování přešlo do druhé fáze.

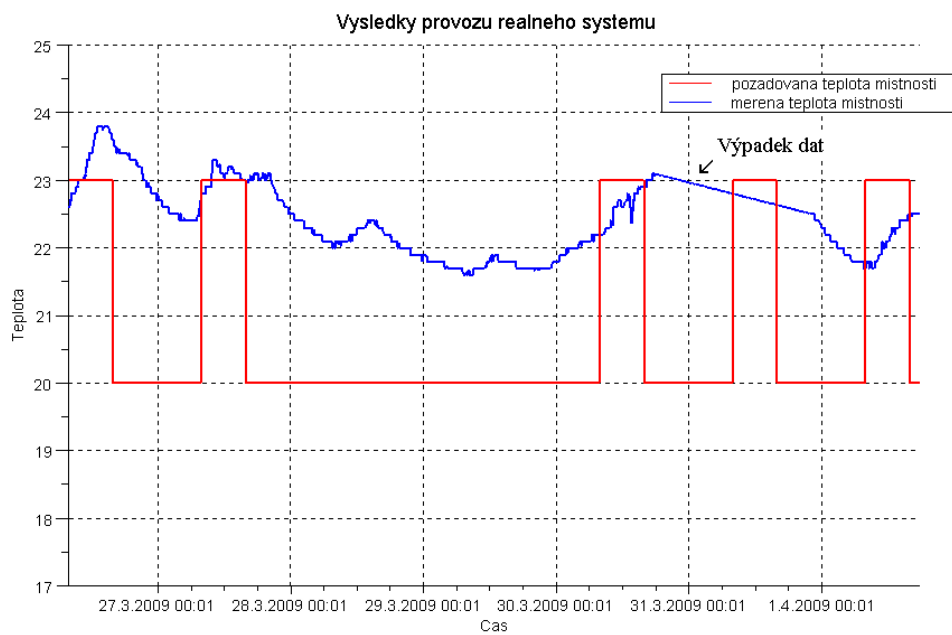
Druhá fáze začala 27. 3. 2009. Řízení je plně prováděno pomocí MPC s pravidelným dohledem. Pro kontrolu a přehled o stavu systému bylo vytvořeno webové rozhraní dostupné na <http://dev.rcware.eu:8815/>. Ukázka je na obrázku 7.1. Jsou zde vyobrazeny průběhy jednotlivých teplot včetně vypočítaného akčního zásahu na horizontu predikce 24 hodin. Další dodatečné informace jsou patrné z obrázku. Toto rozhraní slouží pouze pro zobrazování, nikoliv pro změnu parametrů. Je tedy volně přístupné.



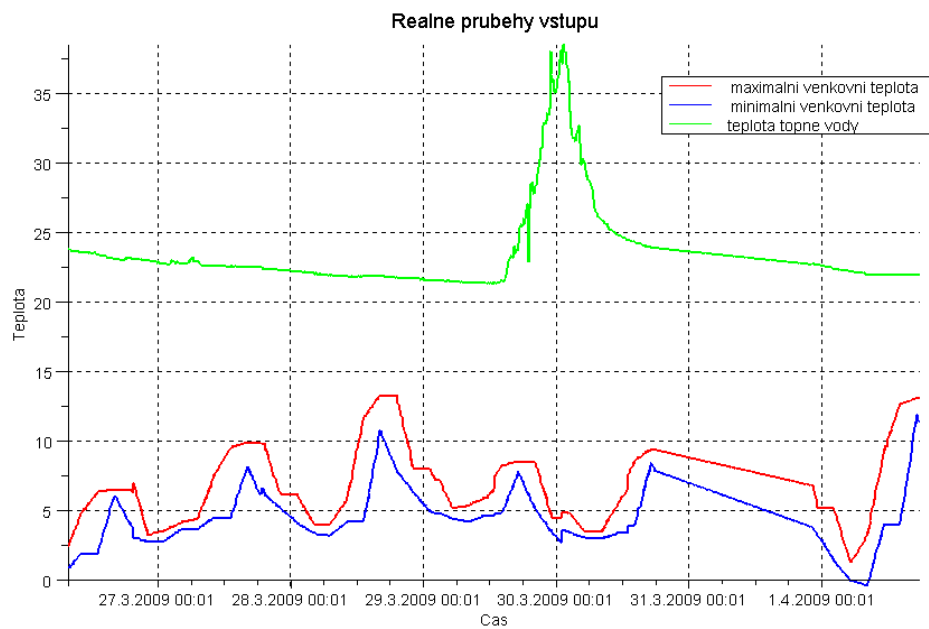
Obrázek 7.1: Ukázka webového rozhraní pro dohled nad systémem

7.3 Výsledky testování

Výsledky z druhé fáze testování jsou na obrázku 7.2. Požadovaná komfortní teplota je nastavena na 23 °C. Tato teplota je sledována s přesností do ± 1 °C. Testování probíhalo i přes víkend, kdy není požadavek na komfortní teplotu. V tomto období budova samovolně vychládá. Nezbytné je zajistit požadovanou komfortní teplotu na pondělí, což je názorné na obrázku 7.3, kdy dochází k dodávání energie a natápění budovy.



Obrázek 7.2: Chování systému při testování



Obrázek 7.3: Průběhy vstupů při testování

Kapitola 8

Závěr

8.1 Shrnutí

Podářilo se mi navrhnout automaticky pracující MPC regulátor udržující teplotu v budově podle zadané reference. Jednou z hlavních podmínek správné funkce regulátoru je dostatečně přesná předpověď minimální a maximální venkovní teploty na jeden den. Správnost funkce byla ověřena týdenním provozem, kde velikost odchylky teploty místnosti od požadované reference nepřesahovala ± 1 °C. S ohledem na setrvačnost a náročnost řízení lze tento výsledek považovat za uspokojivý. Tento regulátor je navržen pro venkovní teploty od -5 do +5 °C. Testován byl v období, kdy venkovní teploty vykazovaly hodnoty od 0 do +12 °C. V porovnání s dosavadním řízením pracuje MPC řízení přesněji a hlavně bez nutné přítomnosti lidského faktoru. Je nutné ale zohlednit pouze týdenní testovací provoz. Delší testování nebylo možné kvůli příliš vysokým venkovním teplotám. Další provoz tedy nelze přesně naplánovat.

Vzhledem k úspěšným dosavadním výsledkům jsou plánovány a projednávány další kroky, které by měli vést k vylepšení a poté i k nasazení této technologie na další budovy.

8.2 Další kroky

Vzhledem k zjištěným výsledkům při testování je plánováno následující:

- Další testování systému při venkovních teplotách, kdy je nutné vytápění budovy

- Zvážení a případné navržení plynulého přepínání více lineárních modelů a vyřešení tak problému nelinearity modelu v závislosti na venkovní teplotě
- Zohlednění teploty vratné vody ze systému, která nese jistou informaci o natopení systému
- Po kvalitním odzkoušení je v plánu rozšíření a aplikace obdobného řízení na další budovy
- Aplikace obdobného řízení na letní ochlazování budovy

8.3 Poděkování

Tento projekt byl realizován za finanční podpory z prostředků státního rozpočtu prostřednictvím Ministerstva průmyslu a obchodu v rámci grantu 2A-1TP1/084, „Integrace systémů budov, výzkum a aplikace inteligentních algoritmů ovlivňujících spotřebu energií budov a obytných domů“.

Literatura

- [1] BAŠTA, J. *Regulace vytápění*. Nakladatelství ČVUT, 2007.
- [2] CAMACHO, E. – BORDONS, C. *Model predictive control*. Springer, 2004.
- [3] CRITTALL, R. G. – MUSGRAVE, J. L. *Heating and cooling of buildings*. 1927. US Patent 1,625,987.
- [4] DE COCK, K. – BART DE MOOR, K. *Subspace identification methods* [online]. 2008. Dostupné z: www.ece.sunysb.edu/decock/subspacemethods.pdf.
- [5] GRUBER, P. – GWERDER, M. – TÖDTLI, J. Predictive Control for Heating Applications, Clima 2000. In *7 th REHVA World Congress, Napoli, Italy*, 2001.
- [6] HAVLENA, V. – ŠTECHA, J. *Moderní teorie řízení*. Vydavatelství ČVUT, 1994.
- [7] HOES, P. et al. User behavior in whole building simulation. *Energy and Buildings*. 2009, 41, s. 295–302.
- [8] INRIA. *Scilab On Line Help* [online]. 2008. Dostupné z: <http://www.scilab.org/product/man>.
- [9] JOE, S. An overview of nonlinear model predictive control applications. *Nonlinear model predictive control*. 2000, s. 369.
- [10] MACIEJOWSKI, J. *Predictive control: with constraints*. Prentice Hall, 2002.
- [11] MIKOLÁŠEK, J. *Modelování systému vytápění budovy*. ČVUT, 2009. Diplomová práce.
- [12] MU, D. – FU, L. – DAI, G. Research on Generalized Predictive Control Algorithm of Networked Control System. In *Control Conference, 2006. CCC 2006. Chinese*, 2006.
- [13] NAPIER, T. A. *Radiant heating*. The Industrial Press, 2nd edition, 1949.

- [14] ROSSITER, J. *Model-based predictive control: a practical approach*. CRC press, 2003.
- [15] ŠIROKÝ, J. – FERKL, L. – LAIN, M. Identifikace systému stropního chlazení Fakulty strojní ČVUT v Praze. Brno, 2008. 5. konference IBPSA-CZ.
- [16] ŠTECHA, J. *Optimální rozhodování a řízení*. Vydavatelství ČVUT, 2000.
- [17] ŠTECHA, J. – HAVLENA, V. *Teorie dynamických systémů*. Vydavatelství ČVUT, 1993.
- [18] TRNKA, P. *Subspace Identification Methods* [online]. 2008. Dostupné z: http://www.trnka.name/download/subspace/oaf_slides2.pdf.

Příloha A : Zdrojový kód implementace prediktivního regulátoru

```
clc;
clear;
exec('Inicializuj.sce');
data=NactiData('B2.mat');
dataUsek=SouvisleUseky(data,20,3000);
dataVyber = VyberData(data,dataUsek(1,4),dataUsek(2,4));
dataNahr=NahradNaN(dataVyber);
dataFinal=Prevzorkuj(dataNahr,600,'linear');
// ***vstupy *****
U3=dataFinal.hodnoty(3); //3. * venkovniMax *
U2=dataFinal.hodnoty(4); //4. * venkovniMin *
U1=dataFinal.hodnoty(5); //5. * vystupS *
// ***vystupy *****
Y2=dataFinal.hodnoty(2); //Teplota v referencni mistnosti

U=[U1 U2 U3];
Y=[Y2];

load('model_parameters_6_25.sav');
// ***** MPC *****
Tp = 50; // doba predikce
N=size(U,1);
//vstupni reference teploty mistnosti
t=1:.02:10;
```

```

horni= 23;
dolni= 20;
maticeref(1:144)=dolni;
maticeref0(1:144)=dolni;
maticeref(1:48)=horni;
reference=[maticeref; maticeref; maticeref0; maticeref0;
    maticeref; maticeref; maticeref; maticeref] ;
[V,S]=NajdiVS(Ad,Bd,Cd,Dd,Tp);
nastavitQ=1000000; //vaha odchylky
nastavitR=1; // vaha ridici veliciny
Q = diag(linspace(0.001, nastavitQ, Tp*size(Cd,1)));
R = nastavitR*eye(Tp*size(Bd,2),Tp*size(Bd,2));
x = zeros(size(Ad,2),1);
load('x.sav');
y_hist = [];
u_hist = [];
H=S'*Q*S + R; // matice H
H=(H+ H')/2;
U_merene=[zeros(size(U1,1),1) U2 U3];
U_new = [];

for i= 1 : 1 : size(U,1);
    U_new = [U_new;U_merene(i,:)'];
end

nuly= zeros(Tp,Tp);
C1=eye(Tp,Tp); // podminky pro venkovni teploty
b1=ones(Tp,1)*0;
C2=eye(Tp,Tp);
b2=ones(Tp,1)*0;

C3=eye(Tp,Tp);
b3=-ones(Tp,1)*-20; // topna voda minimalni
C4=-eye(Tp,Tp);
b4=-ones(Tp,1)*50; // topna voda maximalni

```

```

C5=eye(Tp,Tp-1) -[zeros(1,Tp-1); eye(Tp-1,Tp-1)]; // voda
rychlost zmeny
b5=-ones(Tp-1,1)*5;
C6=-eye(Tp,Tp-1) +[zeros(1,Tp-1); eye(Tp-1,Tp-1)]; //voda
rychlost zmeny
b6=-ones(Tp-1,1)*5;
C=[ [C1;nuly;nuly],[nuly;C2;nuly],[nuly;nuly;C3],[nuly;nuly
;C4],[zeros(Tp,Tp-1);zeros(Tp,Tp-1);C5],[zeros(Tp,Tp-1);
zeros(Tp,Tp-1);C6]];
b=[b1;b2;b3;b4;b5;b6];
y=0;
JeNahore=1;
me=Tp*2;
iterhist=[];

for t = 1 : (N-Tp)
    if (y>dolni+JeNahore*0.5) | or((reference(t:t+Tp-1))==horni
)
        Q = diag(nastavitQ*((reference(t:t+Tp-1))==horni)+
nastavitQ/100);
        JeNahore=0;
    else
        Q = diag(linspace(nastavitQ, nastavitQ, Tp*size(Cd,1)))
;
        JeNahore=1;
    end;

H=S'*Q*S + R; // matice H
H=(H+ H')/2;
yvlnka=V*x + S* U_new(((t-1)*3+1):((t-1)*3+1)+(size(Dd,
2)*Tp)-1);
pp=(-yvlnka+reference(t:t+Tp-1))'*Q*S;

novepp=[];
for h=size(Bd,2):-1:1
    for r= 1:size(Bd,2):size(pp,2)

```

```

        novepp= [novepp, pp(r+h-1)];
    end
end

noveH1=[];
for h=size(Bd,2):-1:1
    for r= 1:size(Bd,2):size(H,2)
        noveH1= [noveH1, H(:, r+h-1)];
    end
end

noveH=[];
for h=size(Bd,2):-1:1
    for r= 1:size(Bd,2):size(H,2)
        noveH= [noveH; noveH1(r+h-1,:)];
    end
end

[Up, lagr , info]=qp_solve(noveH,novepp',C,b,me);

up =Up(2*Tp+1);
up2=U2(t);
up3=U3(t);

if up > 80 then up=80;
end
if up < 20 then up=20;
end

y = Cd*x + Dd*[up up2 up3]';
x = Ad*x + Bd*[up up2 up3]';
y_hist = [y_hist y];
u_hist = [u_hist [up; up2; up3]];
iterhist=[iterhist info];
end

```

Příloha B: Zdrojový kód funkce pro výběr vhodného úseku dat

```
function [FirstArgOut, varargout]=SouvisleUseky(varargin)

    chyba='Neni vystup.';
    FirstArgOut=chyba;

    [lhs, rhs]=argn();

    napoveda=0;
    kratkyhelp='volejte: [indexy] = SouvisleUseky(sloupec_dat
        ,max_vypadek, min_delka) ';

    if rhs==0 then
        napoveda = 1;
    else
        napoveda=(varargin(1)=='help');
    end;
    if napoveda then
        printf('
            *****\n')
        ;
        printf('volejte: [indexy] = SouvisleUseky(data ,
            max_vypadek, min_delka) \n');
        printf('Funkce provede analyzu dat a vrati pocatecni a
            koncove indexy v zadanem sloupci.\n');
        printf('Data se zadavaji jako struktura dat\n');
        printf('\n');
```

```

printf('Autor: Jakub Kubecek, 13.10.2008.\n');
printf('
    *****\n')
    ;
return(0);
elseif varargin(1)=='gethelp' then
    FirstArgOut=kratkyhelp;
    return(0);
else

maxVypadek=varargin(2);
minimalnidelka=varargin(3);
data=varargin(1);
A=data.hodnoty(1)(1:$-1,1);
B=data.hodnoty(1)(2:$,1);
C=B-A;

minut=(datenum(2000,1,1,0,maxVypadek,0)-datenum
    (2000,1,1,0,0,0))// urci pocet minut
E=(find(C>minut));// nalezne mista kde se vzorkovani zvetsi
    nad zadanou
useky = zeros(length(C),length(E));
indexy= eye(2,length(E)); // matice s indexy zacatku a
    konce useku
for i=1:length(E)-1
    if(i==1)
        useky(1:E(i),1)=C(1:E(i),1);
        indexy(2,1)=E(1);
        indexy(1,2)=E(1)+1;
    end
    useky(E(i)+1:E(i+1),i)=C(E(i)+1:E(i+1),1);
    indexy(2,i)=E(i+1);
    indexy(1,i+1)=E(i+1)+1;
end

useky(E($):$, $)=C(E($):$,1);

```

```

indexy(2,$)=length(C);
indexy
delky=(indexy(2,:)-indexy(1,:));
F=find(delky<minimalnidelka)// prefiltruji matici a
    odstranim useky s mensim poctem vzorku zadano jako
    parametr
indexy(:,[F])=[];

for i = 1: length(indexy(1,:))
    [Y1,M1,D1,H1,MI1,S1]= datevec(datenum(2008, 1, 30, 11,
        45, 00)-data.hodnoty(1)(2)+ data.hodnoty(1)(indexy(1,i)
        )) ;
    [Y2,M2,D2,H2,MI2,S2]= datevec(datenum(2008, 1, 30, 11,
        45, 00)-data.hodnoty(1)(2)+ data.hodnoty(1)(indexy(2,i)
        )) ;
    printf('\n %10d | %4d%2d.%2d. %2d:%02d:%02d | %4d%2d.%2d.
        %2d:%02d:%02d |%20d',i ,Y1,M1,D1,H1,MI1,S1,Y2,M2,D2,
        H2,MI2,S2,indexy(2,i)-indexy(1,i));
end

printf('\n');
FirstArgOut=indexy
end;
endfunction

```