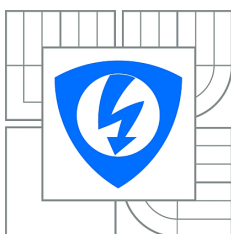


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

POKROČILÉ ALGORITMY ŘÍZENÍ TEPLOTY V MÍSTNOSTI ROOM TEMPERATURE ADVANCED CONTROL ALGORITHMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

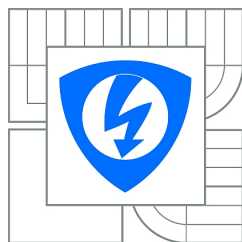
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN GLOS

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. PAVEL VÁCLAVEK, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Jan Glos
Ročník: 3

ID: 125430
Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Pokročilé algoritmy řízení teploty v místnosti

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s existujícími způsoby řízení teploty v místnosti. Navrhněte model řízeného systému a pokuste se vytvořit vlastní algoritmy řízení uvažující koordinaci různých zdrojů ohřevu/chlazení. Algoritmy ověřte simulací v prostředí Matlab-Simulink.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] M. Vasak, A. Starcic, and A. Martincevic, "Model predictive control of heating and cooling in a family house," in Proceedings of the 34th International Convention MIPRO, 2011, 2011, pp. 739–743.

další dle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 27.5.2013

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Václavek, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá sestavením tepelného modelu konkrétní místnosti a návrhem algoritmů pro ohřev a chlazení této místnosti. Pro vytvoření přesného modelu je použito rozšíření Simscape pro Matlab/Simulink a model je sestaven výhradně podle reálných vlastností místnosti a jejích stěn (materiály, rozměry apod.). V rámci této práce jsou navrženy prediktivní (MPC - Model Predictive Control) a PI regulátory. Ve srovnání s původní regulací dosahují navržené regulátory lepší kvalitu regulace a prediktivní regulátory vycházejí v porovnání jako nejvhodnější. Kvůli přípravě na integraci splitové klimatizační jednotky, možnosti ovládání akčních členů pomocí MPC regulátoru realizovaného v Matlabu a kvůli nutnému rozdělení žádaných hodnot pro vytápění a chlazení bylo přepracováno softwarové vybavení kontroléru pro řízení technologií v místnosti.

Summary

This bachelor's thesis deals with constructing a thermal model of the specific room and algorithms design for heating and air conditioning. The model is created using Simscape extension for Matlab/Simulink and is based on real attributes of room and its walls (materials, dimensions etc.). This thesis contains design of MPC (Model Predictive Control) and PI controllers. In comparison with the original regulation designed controllers achieve better quality of control and MPC controllers seems to be the best. Because of preliminary for integration of split air conditioner, possibility of control actuators by MPC controller and because of necessary setpoint separation (for heating and air conditioning) software equipment of the individual zone controller was revised.

Klíčová slova

prediktivní regulace, Matlab-Simulink, Simscape, individuální regulace teplot v místnostech, Kalmanův filtr, BACnet

Keywords

model predictive control, Matlab-Simulink, Simscape, individual room control, Kalman filter, BACnet

GLOS, J. *Pokročilé algoritmy řízení teploty v místnosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 65 s. Vedoucí doc. Ing. Pavel Václavek, Ph.D.

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Pokročilé algoritmy řízení teploty v místnosti” jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 27. května 2013

.....
podpis autora

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Pavlovi Václavkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 27. května 2013

.....
podpis autora

Obsah

Úvod	9
1 Regulace teploty v místnosti	10
1.1 Lokální regulace teploty	10
1.2 Regulace centrálních zdrojů tepla/chladu	11
2 Popis místnosti a jejího vybavení	14
3 Řídicí systém budov - BMS MU	16
3.1 SW a HW prostředky	16
3.2 Technologické prostředky	16
3.3 Komunikační prostředky	18
4 Teplota, teplo a přenos tepla	20
5 Matlab/Simulink, Simscape	22
6 Tepelný model místnosti	24
6.1 Porovnání modelovaných průběhů teploty se skutečnými	28
6.2 Úprava tepelného modelu místnosti pro návrh regulátorů	33
7 Prediktivní regulace	45
7.1 Luenbergerův stavový pozorovatel	46
7.2 Kalmanův filtr	46
8 Návrh regulátorů	49
8.1 Prediktivní regulátory - MPC	49
8.2 PI regulátory	49
8.3 Úpravy v kontroléru	52
8.4 Porovnání navržených regulátorů	53
9 Závěr	58
Literatura	60
Seznam použitých symbolů a zkratek	63
Seznam příloh	65

Seznam obrázků

1.1	Příklad sady ekvitermních křivek	12
2.1	Grafické zobrazení místnosti 309 pavilonu A7 ve Stavebním pasportu . . .	14
3.1	Obrazovka pro sledování a řízení IRC pavilonu A7, 3.NP	17
3.2	Kontrolér DFC-304	18
3.3	Ovládací panel DNS-24l	18
5.1	Thermal Sources v Simscape	22
5.2	Thermal Elements v Simscape	23
5.3	Thermal Sensors v Simscape	23
6.1	Model místnosti se zdroji tepla a chladu	24
6.2	Vrstva stavební konstrukce modelu místnosti	25
6.3	Model části stavební konstrukce - strop	26
6.4	Model venkovní teploty	26
6.5	Model vlivu vzduchotechniky na modelovanou místnost	27
6.6	Model fancoilu	27
6.7	Model otopných těles	28
6.8	Průběh teploty v místnosti 24.10.2012	30
6.9	Provoz fancoilu 24.10.2012	30
6.10	Průběh teploty v místnosti 28.10.2012	31
6.11	Průběh teploty vzduchu dodávaného vzduchotechnikou dne 28.10.2012 . . .	31
6.12	Průběh teploty v místnosti 25.11.2012	32
6.13	Průběh provozu otopných těles a teploty topné vody 25.11.2012	32
6.14	Náhradní schéma místnosti	33
8.1	Kořenový hodograf soustavy a regulátoru otopného tělesa	50
8.2	Kořenový hodograf soustavy a regulátoru fancoilu	51
8.3	Odezva na jednotkový skok žádané hodnoty pro topení	54
8.4	Akční zásahy u odezvy na jednotkový skok žádané hodnoty pro topení . . .	54
8.5	Odezva na jednotkový skok žádané hodnoty pro fancoil	55
8.6	Akční zásahy u odezvy na jednotkový skok žádané hodnoty pro fancoil . . .	55
8.7	Odezva na skok poruchy pro topení - výrazný pokles venkovní teploty . . .	56
8.8	Akční zásahy u odezvy na skok poruchy pro topení pro topení - výrazný pokles venkovní teploty	56
8.9	Odezva na skok poruchy pro fancoil - výrazné zvýšení venkovní teploty . . .	57
8.10	Akční zásahy u odezvy na skok poruchy pro fancoil - výrazné zvýšení ven- kovní teploty	57

Seznam tabulek

2.1	Údaje o místnosti ze Stavebního pasportu	14
2.2	Technické údaje fan-coil jednotky Carrier 42GWC 010	15
2.3	Technické údaje radiátoru CosmoNova 22-5060K	15
6.1	Korekční faktor vlivu otáček ventilátoru fancoilu na jeho výkon	27

Úvod

Tato práce řeší návrh algoritmů pro individuální regulaci teploty v místnosti. Jejich účelem je zabezpečit optimální regulaci na požadovanou teplotu a zároveň koordinaci různých zdrojů ohřevu a chlazení, zejména radiátoru, fancoilu a vzduchotechniky.

Součástí práce je tepelný model místnosti včetně zdrojů ohřevu a chlazení. Model je navržen v programu Matlab/Simulink s využitím rozšíření Simscape pro Simulink. Použití tohoto rozšíření výrazně usnadňuje modelování fyzikálních systémů. Zjednodušený model je použit pro návrh algoritmů pro individuální regulaci teploty v místnosti.

Individuální regulace teploty v místnosti je důležitá z pohledu uživatelského komfortu, zajištění stálosti prostředí (např. pro laboratorní výzkum) a má značný ekonomický dopad. Úprava teploty vzduchu je energeticky náročná, proto špatně nastavená regulace, protichůdný provoz zdrojů tepla a chladu nebo nadbytečné topení/chlazení mají vliv na spotřebu energií a tím ovlivňují nákladnost provozu budovy.

Motivací pro realizaci algoritmů byl požadavek na možnost integrace splitu se stávajícím systémem vytápění a chlazení. Koordinací těchto zdrojů tepla/chladu má být zajištěno, že nedojde k protichůdnému provozu vytápění a chlazení. Zároveň je možné řízením chodu agregátů dosáhnout úspor spotřeb energií. Dalším důvodem k návrhu těchto algoritmů je neuspokojivá kvalita stávající regulace teploty a nemožnost integrace v budoucnu doplňovaných technologií do původních algoritmů regulace.

1. Regulace teploty v místnosti

Pojem tepelná pohoda můžeme chápat jako takový stav prostředí, kdy člověku není ani teplo, ani zima. Tepelná pohoda je tedy značně subjektivní, avšak částečně je možné ji popsat objektivně.

Tepelnou pohodu ovlivňuje zejména teplota a vlhkost vzduchu, rychlost proudění vzduchu, teplota okolních ploch a další individuální parametry (oblečení, tělesná konstituce, pohlaví, věk, zdravotní stav člověka a další)[1].

Tepelnou pohodu na pracovišti upravuje zákon č. 309/2006 Sb. a nařízení vlády č. 361/2007 Sb., které bylo změněno nařízením vlády č. 93/2012 Sb. Těmito právními normami jsou mimo jiné určeny minimální a maximální hodnoty parametrů prostředí (teploty, vlhkosti a rychlosti proudění vzduchu) pro různé třídy práce [2]. Zmíněné právní předpisy byly respektovány při tvorbě této práce.

Tepelnou pohodu v budovách zajišťují systémy HVAC (heating, ventilation and air conditioning), které jsou řízeny systémem MaR (měření a regulace). Obvykle je technicky nejlépe realizovatelná regulace teploty vzduchu v místnosti. Dále je možné regulovat vlhkost vzduchu (zvyšování vlhkosti vzduchu zejména v zimním období lokálními nebo centrálními zvlhčovači). Rychlost proudění vzduchu ovlivňují stavební vlastnosti místnosti (případně budovy), vzduchotechnika a další zdroje pohybu vzduchu (okna, ventilátory, apod.). Individuální parametry (oblečení, tělesná konstituce, pohlaví, věk, zdravotní stav člověka a další) není možné ovlivnit technickými prostředky HVAC a MaR.

Zajištění tepelné pohody je energeticky (a tedy i ekonomicky) náročný proces. Často bývá výsledné prostředí v budově kompromisem mezi tepelnou pohodou a náklady na její zajištění. Proto je vhodné zajistit kvalitní regulaci parametrů prostředí, poté je možné se stejnými náklady zajistit lepší tepelnou pohodu.

Další část této kapitoly se věnuje možnostem regulace teploty vzduchu v místnosti včetně popisu výhod a nevýhod jednotlivých možností.

1.1. Lokální regulace teploty

Bez regulace

V tomto případě je teplota vzduchu v místnosti ovlivňována centrální regulací teploty, příkladem může být otopné těleso bez regulačního ventilu. Tento způsob je pro udržení tepelné pohody zcela nevhodný, je v podstatě nereálné zajistit vhodnou a stabilní teplotu vzduchu v místnosti.

Manuální ovládání

Jedná se o ruční ovládání zdrojů tepla v místnosti, například regulační ventil na otopném tělese, ručně ovládaný elektrický přímotop, kamna či krb na pevná paliva a další.

Nevýhodou tohoto způsobu regulace teploty je závislost na uživateli (akční zásah může provést pouze uživatel a většinou teplotu řídí subjektivně). Výhodou je nízká pořizovací cena systému ovládání.

Manuální ovládání s termostatem

V tomto případě uživatel nastaví požadovanou teplotu a jednoduchý regulační systém (termostat) zajišťuje její dodržování. Příkladem je termostatická hlavice ventilu otopného tělesa, elektrický přímotop s termostatem nebo tzv. mobilní klimatizace.

Nevýhodou tohoto systému ovládání je jeho autonomnost (jeden zdroj tepla/chladu nedokáže spolupracovat s ostatními) a opět závislost na uživateli (např. zajištění odstavení lokálního zdroje tepla/chladu při otevřeném okně, přechod do útlumového režimu při neobsazení místnosti). Výhodou jsou nízké pořizovací náklady na regulační systém a možnost dosažení žádané teploty vzduchu.

IRC - Individuální regulace teplot v místnostech

Jedná se o použití složitějšího regulačního systému, který řídí teplotu v místnosti. Obvykle se systém skládá z řídicí jednotky (PLC - kontrolér), ovládacího panelu s vestavěným snímačem teploty a z akčních členů (ventily, ventilátory). Řídicí jednotky mohou pracovat samostatně, nebo je možné je propojit komunikační sběrnici, která umožní jejich vzdálené ovládání.

Nevýhodou tohoto systému jsou vysoké pořizovací náklady a případně složitost ovládání, dle [3] mohou mít uživatelé značné problémy s ovládáním systémů individuální regulace teplot v místnostech (IRC - Individual Room Control). Mezi výhody patří možnost vzdáleného dohledu a ovládání, možnost nastavení časových plánů, reakce na otevření okna, možnost spolupráce více zdrojů tepla a chladu, možnost komunikace s centrálním zdrojem tepla/chladu a možnost sběru dat pro vyhodnocení nákladů a optimalizaci regulačních procesů.

Obvykle systém IRC ovládá ventil otopného tělesa a akční členy fancoilu, tedy ventil chladicí vody a otáčky ventilátoru (většinou ve třech stupních a vypnuto). V PLC je většinou implementován jeden nebo více regulátorů pro řízení akčních zásahů těchto členů. Regulátory jsou v komerčně nabízených systémech buď typu PID, častěji však pouze PI, protože derivační složka v kombinaci s velkými časovými konstantami a možnými šумы při měření aktuální teploty mohou způsobit zbytečné kmitání akčních členů. PI regulátory jsou dostatečné pro většinu aplikací v budovách, doplněním derivační složky nebývá dosaženo výrazného zlepšení kvality regulace. Regulátory jsou často označovány jako PI a PID (spojité) i přes to, že jsou realizovány číslicově v PLC, nastavování jejich parametrů probíhá obdobně jako pro spojitý regulátor a převod na diskrétní regulátor zajišťuje PLC. Pro některé aplikace se místo PI (PID) regulátoru používá relé s hysterezí (např. v některých aplikacích může být reléová regulace pro ovládání termoelektrického pohonu ventilu dostatečná). Někteří výrobci implementovali do PLC pro IRC tzv. „self-tuning“ - PLC pomocí některé z metod návrhu regulátorů vypočítá parametry regulátoru.

1.2. Regulace centrálních zdrojů tepla/chladu

Centrální zdroje chladu se většinou regulují na konstantní teplotu chladicí kapaliny (voda, glykol), obvyklá hodnota je 6°C.

Ruční regulace výkonu zdroje tepla

Tento způsob regulace teploty se používal převážně v minulosti, avšak i dnes stále najde své uplatnění. Zejména se jedná o zdroje tepla využívající pevná paliva (kotle, krby, kamna), kde se výkon (či teplota topné vody) reguluje množstvím paliva.

Nevýhod je celá řada, mezi nejvýznamnější můžeme zařadit nutnost nepřetržité obsluhy, nemožnost zajištění vyhovujícího výkonu a s tím související nemožnost dosažení žádané hodnoty teploty. Výhodou je nízká pořizovací cena systému a i nízké provozní náklady (použití pevných paliv patří mezi nejlevnější způsoby vytápění).

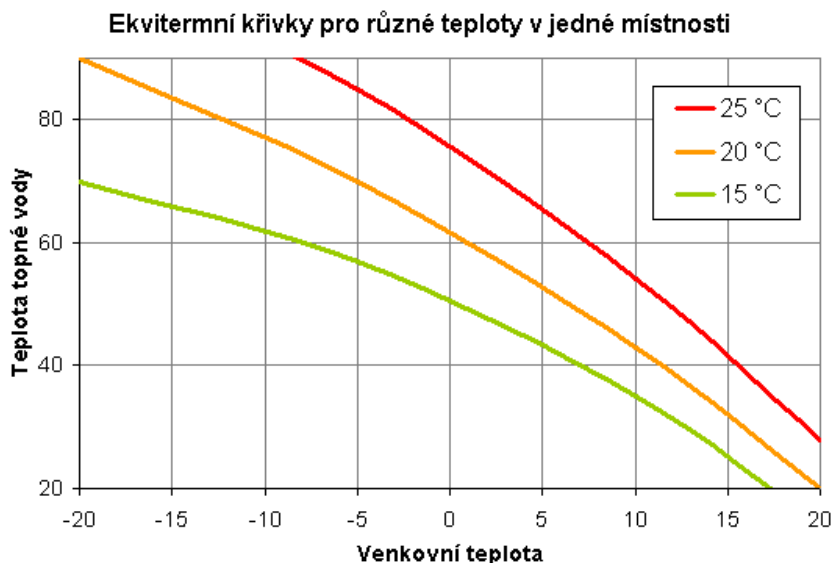
Regulace teploty pomocí termostatu v referenční místnosti

Principem regulace je spínání zdroje tepla podle termostatu v referenční místnosti. V případě použití teplovodní otopné soustavy bývá pevně nastavena teplota topné vody a pouze dochází ke spínání zdroje tepla. Toto řešení se často používá v kombinaci s termostatickými ventily.

Nevýhodou tohoto řešení je závislost teploty vzduchu v celém objektu na teplotě vzduchu v referenční místnosti, tedy pokud je v referenční místnosti dostatečně vysoká teplota a v ostatních místnostech nižší, zdroj tepla bude vypnutý a v místnostech s nižší teplotou nebude k vytápění docházet. Výhodou je nízká pořizovací cena. Většinou je tento systém dostatečný pro menší objekty (velikosti rodinného domu).

Ekvitermní regulace topné vody

Teplota topné vody se stanoví podle tzv. ekvitermní křivky, což je závislost teploty topné vody na venkovní teplotě při konstantní teplotě vzduchu v místnosti. Většinou se používá sada ekvitermních křivek (pro různé teploty vzduchu). Nastavení ekvitermní křivky je individuální pro každý vytápěný objekt a je nutné mu ekvitermní křivku přizpůsobit.



Obrázek 1.1: Příklad sady ekvitermních křivek [4]

1.2. REGULACE CENTRÁLNÍCH ZDROJŮ TEPLA/CHLADU

Nevýhodou použití ekvitermní křivky je složitost a náročnost jejího nastavení a vyšší pořizovací cena systému. Výhodou je nezávislost místností, v každé místnosti je možné regulovat teplotu individuálně (některým způsobem podle kap. 1.1) a výkon (teplota topné vody) by měl být dostatečný pro zajištění žádané hodnoty teploty v každé místnosti. Ekvitermní regulace také může zajistit nižší kolísání teplot v místnostech, což zvyšuje tepelnou pohodu a snižuje náklady na vytápění.

2. Popis místnosti a jejího vybavení

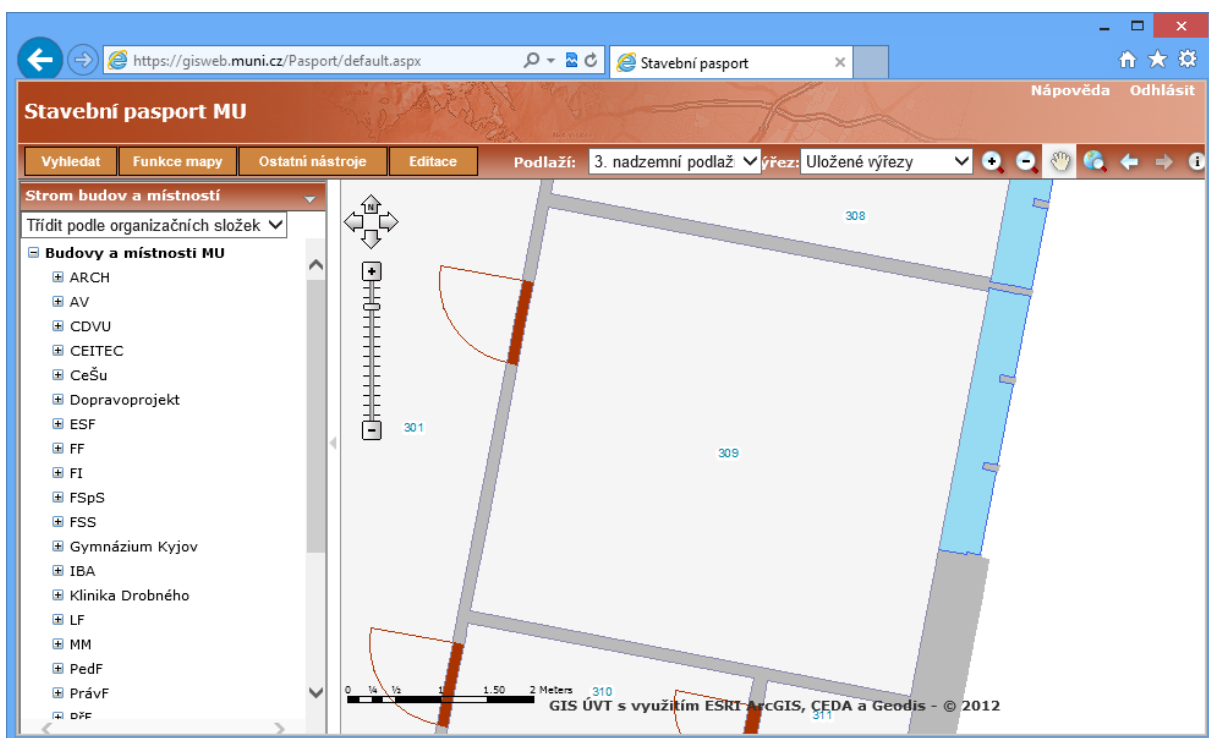
V této práci se jedná o místnost číslo 309 pavilonu A7 v Univerzitním kampusu Bohunice Masarykovy univerzity. Pavilon byl postaven před pěti lety a mezitím se již změnilý účely jednotlivých místností, je tedy nutné řízení technologií upravit pro zajištění odpovídající tepelné pohody.

Jedním ze zdrojů dat v této kapitole je Stavební pasport Masarykovy univerzity. Stavební pasport je nástroj pro evidenci budov a místností, do kterého je možné po autentizaci nahlížet na adrese maps.muni.cz. Tato aplikace je zdrojem základních informací o místnosti A7 309 - viz tabulka 2.1 a obrázek 2.1.

Stavební pasport dále poskytuje data pomocí mapových služeb pro další aplikace (evidence majetku, Technologický pasport, IS MU, IS BAPS, [muni.cz](https://maps.muni.cz) atd.). [5]

Tabulka 2.1: Údaje o místnosti ze Stavebního pasportu

Polohový kód	BHA08N03020
Číslo	309
Název	laboratoř
Účel	laboratoř
Plocha [m ²]	21,57
Výška [m]	2,77
Obvod [m]	18,59
Okna počet	3
Dveře počet	1



Obrázek 2.1: Grafické zobrazení místnosti 309 pavilonu A7 ve Stavebním pasportu

Údaje o konstrukci stěn, stropu a podlahy byly získány z Dokumentace skutečného provedení stavby AVVA MODRÁ, část A7. Podrobné složení obvodových konstrukcí je uvedeno v Příloze 1.

V místnosti je instalována stropní kazetová jednotka Carrier 42GW010. V tabulce 2.2 jsou uvedeny technické údaje, které byly zjištěny v katalogovém listu výrobce. [6] Fan-coil se v této místnosti používá pouze pro chlazení.

Tabulka 2.2: Technické údaje fan-coil jednotky Carrier 42GWC 010

Celkový chladicí výkon	[kW]	4,7
Citelný chladicí výkon	[kW]	3,9
Průtok chladicí vody	[l/s]	0,22
Průtok vzduchu (níz./stř./vys.)	[l/s]	131/167/236

Výkon fan-coilu je možné řídit dvěma způsoby, regulací průtoku chladicí vody chladicem pomocí tříbodového ventilu a zároveň změnou otáček ventilátoru fan-coilu (vypnuto, nízké, střední, vysoké).

V místnosti jsou instalována dvě otopná tělesa (radiátory) CosmoNova 22-5060K. V tabulce 2.3 jsou uvedeny technické údaje[7], které byly dále použity pro modelování.

Tabulka 2.3: Technické údaje radiátoru CosmoNova 22-5060K

Výkon otopného tělesa	[kW]	0,745
Objem vody v radiátoru	[l]	3,66

Radiátory jsou osazeny dvoustavovými ventily. Jejich výkon je možné řídit pomocí reléové regulace nebo PWM. Dále výkon otopných těles ovlivňuje teplota topné vody, která je přiváděna z rozdělovače ÚT. Regulace teploty topné vody se provádí na základě nastavené ekvitermní křivky.

Nucenou výměnu vzduchu v místnosti zajišťuje vzduchotechnická jednotka, která je společná pro většinu místností pavilonu A7. Z půdorysných výkresů bylo zjištěno, že objem přiváděného vzduchu je 500 m³/h a objem odtahovaného 600 m³/h. VZT jednotka je vybavena topným a chladicím registrem, teplota přiváděného vzduchu by tedy měla být v čase konstantní (a odpovídat nastavené žádané hodnotě). Výkon ventilátorů je možné řídit pomocí frekvenčních měničů a z důvodu energetických úspor je jednotka vybavena rekuperátorem.

3. Řídicí systém budov - BMS MU

Dle [8] je Building Management System Masarykovy univerzity (BMS MU) soubor HW, SW, technologických a komunikačních prostředků umožňujících místní i vzdálený management technologií v budovách a areálech budov. Mezi technologie integrované do BMS patří Měření a regulace (MaR), Elektronická zabezpečovací signalizace (EZS), Elektrická požární signalizace (EPS), Kamerový systém (CCTV), Elektronická kontrola vstupu (EKV) a další.

Prostředky důležité pro moji práci se pokusím popsat v následujících kapitolách.

3.1. SW a HW prostředky

SW a HW prostředky jsou spolu logicky svázané, proto je uvádím dohromady v jedné kapitole.

ORCAview je základní softwarovou aplikací firmy Delta Controls. Plní funkci jak operátorské, tak i servisní stanice, tzn. umožňuje kromě sledování a ovládání připojených systémů i programování kontrolérů, vytváření a úpravy obrazovek a další. Jádrem aplikace je komunikační adaptér BACnet, který se používá i pro ORCAweb a Historian. Software je certifikován BTL logem [9] a jeho vlastnosti v rámci protokolu BACnet popisuje soubor PICS.[9]

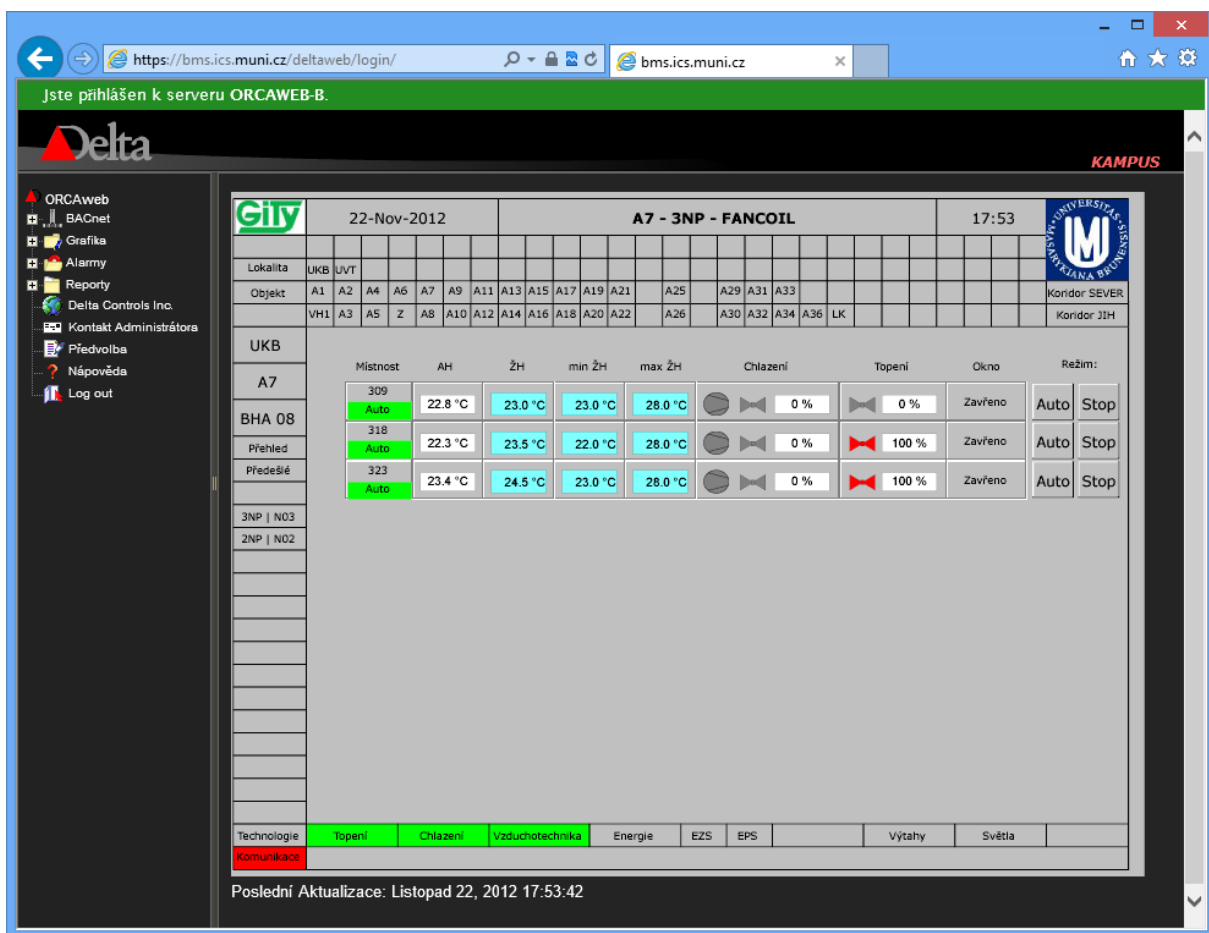
ORCAweb je aplikace dostupná na webových serverech, která umožňuje uživatelům (Správa budov, zaměstnanci,...) sledovat a ovládat technologie v budovách. Pro ovládání každé technologie je vytvořena sada obrazovek, na kterých je vizualizován aktuální stav dané technologie ve formě technologického schématu, půdorysného zobrazení nebo ve formě textové. ORCAweb dále umožňuje práci s alarmy (zobrazení, potvrzení), prezentaci historických dat, nastavení časových plánů atd. Přístup na webové servery je řízen uživatelskými právy, které umožňují dostatečně jemné nastavení jednotlivých rolí.

Momentálně jsou na MU provozovány dva webové servery zapojené v load-balancingu (pro rozdělení zátěže a vyšší odolnost vůči výpadkům). Aplikace ORCAweb nativně komunikuje s ostatními prostředky BMS prostřednictvím protokolu BACnet.

Archivační server se skládá z několika částí (aplikace Historian, diskové pole, fyzické servery, virtuální servery,...). Všechny tyto prostředky tvoří dohromady archivační server, který zajišťuje ukládání historických dat z BMS (trendy, alarmy, přístupy, apod.) do relační databáze. S takto uloženými daty je možné nadále pracovat pomocí aplikací ORCAweb a ORCAview (a i jakékoliv jiné aplikace komunikující prostřednictvím protokolu BACnet), nebo je možné k datům přistupovat přímo v databázi.

3.2. Technologické prostředky

Technologickými prostředky rozumíme fyzická zařízení, která se přímo podílejí na řízení technologií v budovách. Vybral jsem pouze ta zařízení, která mají přímou souvislost s touto prací, celkový rozsah použitých zařízení je výrazně větší.



Obrázek 3.1: Obrazovka pro sledování a řízení IRC pavilonu A7, 3.NP [10]

Kontrolér DFC-304R3 je volně programovatelný regulátor pro individuální řízení fan-coilu a vytápění. Nativně komunikuje protokolem BACnet MS/TP (RS-485), pomocí kterého je možné jej připojit k nadřazenému kontroléru (který již komunikuje se servery a stanicemi BMS pomocí BACnet/Ethernet nebo BACnet/IP).

Technická specifikace DFC-304R3 [11]:

1. Profil zařízení: B-AAC (BACnet Advanced Application Controller)
2. Vstupy a výstupy
 - 2 univerzální vstupy (0-5 V, 0-10 V, 10 k Ω , 4-20 mA)
 - 1 bezpotenciálový vstup (nebo 10 k Ω)
 - 4 binární triakové výstupy (24 VAC)
 - 3 binární reléové výstupy (230 VAC)
3. Napájení
 - Vstupní: 240 VAC, 50/60 Hz, maximálně 2000 VA
 - Výstupní: 24 VAC, 50/60 Hz, 3 VA (pro ovládací panel DNS-24L)



Obrázek 3.2: Kontrolér DFC-304 [11]



Obrázek 3.3: Ovládací panel DNS-24L [12]

4. Komunikační porty

- NET1: BACnet MS/TP (rychlosti 9600, 19200, 38400, 76800 Bd)
- NET2: Delta LINKnet (rychlost 76800 Bd)

DNS-24L je ovládací panel, který je možné připojit ke většině kontrolérů Delta Controls pomocí protokolu LINKnet. Nejčastěji se používá v kombinaci s DFC-304R3 (i v tomto případě). Panel obsahuje segmentový LCD displej, čtyři tlačítka a interní snímač teploty ($10\text{ k}\Omega$, $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ v rozsahu $0 - 70\text{ }^{\circ}\text{C}$).

3.3. Komunikační prostředky

Komunikační prostředky jsou souhrn HW, SW a předpisů, pomocí nichž mezi sebou komunikují jednotlivé prvky BMS MU (kontroléry, operátorské stanice, servery atd.). Mezi HW patří komunikační linka RS-485 (nebo RS-232), strukturovaná kabeláž kategorie 5e a aktivní síťové prvky. Mezi SW patří programové vybavení aktivních prvků a gateway (které překládají protokoly mezi sebou). Do skupiny předpisů můžeme zařadit komunikační protokoly, kterým je věnován zbytek kapitoly.

V [8] je definován BACnet jako základní a závazný protokol. Jedná se o standardizovaný otevřený protokol, který byl vyvinut pro komunikaci systémů a zařízení v budovách.[13] Je definován v normě ANSI/ASHRAE Standard 135-2010, *BACnet – A Data Communication Protocol for Building Automation and Control Networks*. Výhod BACnetu oproti ostatním protokolům (LONWORKS, EIB, KNX, M-Bus, Modbus, ARION,...) je hned několik:[14]

3.3. KOMUNIKAČNÍ PROSTŘEDKY

- otevřenost protokolu (protokol je velmi dobře popsán v normě a jeho použití není zpoplatněno)
- nezávislost na výrobci zařízení (BACnet nebyl vyvinut žádným z výrobců, postupně jej začali implementovat)
- podpora hlavních výrobců technologií automatizace budov (Delta Controls, Honeywell, SAIA Burgess, Siemens, Johnson Controls, WAGO atd.)
- zaměnitelnost zařízení od různých výrobců
- fyzická vrstva protokolu může být rozmanitá (od sériových linek - RS-232, RS-485 - až po IEEE 802.3 - ethernet (metalický nebo optický))
- možnost integrace různých technologií do jednotného systému

V posledních letech výrobci doplňují možnost komunikace protokolem BACnet i dalším zařízením (kromě kontrolérů pro řízení HVAC). Jedná se například o ústředny EPS (Honeywell Esser, Schrack), ústředny EZS (Honeywell Galaxy, Dominus Millenium), elektroměry (Veris E50H5), zdroje chladu (Trane, Carrier, Daikin) a frekvenční měniče (ABB, Danfoss).

4. Teplota, teplo a přenos tepla

Pro potřeby návrhu regulátoru byl vytvořen tepelný model místnosti v programu Matlab/Simulink. Tato kapitola se věnuje fyzikálním principům, které byly využity při tvorbě modelu.

Teplota je základní jednotkou SI a je to vlastnost určitého tělesa v tepelně rovnovážném stavu.[15] Základní jednotkou je kelvin (K), vedlejší jednotkou je stupeň Celsia (°C). Teplota se měří teploměrem, historicky jsou nejvýznamnější dilatační (rtuťové, lihové a bimetalové). V současné době již převažují teploměry odporové a termoelektrické. Všechny průběhy teplot použité v této práci byly naměřeny odporovými snímači, konkrétně polovodičovými typu negastor - NTC.[16] Tento způsob měření teploty podrobněji popíšu.

K výrobě snímačů se používají práškové oxidy kovů, které se spékají do požadovaných tvarů snímačů. Negastory (NTC) mají negativní teplotní koeficient, tzn. s rostoucí teplotou klesá odpor snímače. Uvádí se vztah (4.1) pro závislost odporu negastoru na teplotě, avšak tento vzorec není zcela přesný[16]

$$R \approx R_0 e^{-B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}, \quad [\Omega] \quad (4.1)$$

kde R je odpor termistoru, R_0 je odpor termistoru pro referenční teplotu $T_0 = 298,15\text{K}$ (25°C), T je aktuální teplota a B je materiálová konstanta. Ke každému snímači je nutná tabulka k převodu měřené elektrické veličiny na teplotu.

Teplo je energie vyměněná mezi systémem a okolím jako důsledek teplotního rozdílu mezi nimi. [15] Teplo může být záporné nebo kladné (kladné je, pokud okolí dodává teplo systému) a je dějovou veličinou. Základní jednotkou dle SI je joule (J).

Tepelná kapacita určitého tělesa popisuje, kolik je třeba tělesu dodat tepla, aby se jeho teplota změnila o 1 K.

$$Q = C(T_f - T_i), \quad [\text{J}] \quad (4.2)$$

$$C = \frac{Q}{T_f - T_i}, \quad [\text{J/K}] \quad (4.3)$$

kde Q je teplo, C je tepelná kapacita, T_i je počáteční teplota a T_f je konečná teplota tělesa.

Měrná tepelná kapacita je vlastnost materiálu, která specifikuje, kolik tepla je třeba dodat hmotnostní jednotce materiálu, aby se jeho teplota změnila o 1 K.

$$Q = cm(T_f - T_i), \quad [\text{J}] \quad (4.4)$$

$$c = \frac{Q}{m(T_f - T_i)}, \quad [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \quad (4.5)$$

kde Q je teplo, c je měrná tepelná kapacita, m je hmotnost, T_i je počáteční teplota a T_f je konečná teplota tělesa.

Přenos tepla je možný třemi způsoby [15]:

1. Vedením

Při přenosu tepla vedením se uplatňují atomy a elektrony. V oblasti s vyšší teplotou mají atomy větší amplitudu kmitů (a tím i energii), srážkami s okolními atomy se zvětšuje amplituda kmitů atomu v místech s nižší teplotou a tím dochází k vedení tepla.

Tok tepla deskou o průřezu S a tloušťce d je definován takto:

$$H = \frac{Q}{t} = \lambda S \frac{T_1 - T_2}{d}, \quad [\text{J/s}] \quad (4.6)$$

kde H je tepelný tok, Q je teplo, t je čas, λ je součinitel tepelné vodivosti a T_1, T_2 jsou teploty prostředí na opačných stranách desky.

2. Prouděním

Přenos tepla prouděním vzniká při styku tělesa s tekutinou (s rozdílnými teplotami). V případě, že těleso má vyšší teplotu, část tekutiny se od tělesa ohřeje, zvětší svůj objem, zmenší hustotu a tím získá tendenci stoupat vzhůru. Pro případ, že má těleso nižší teplotu, tekutina klesá dolů.

3. Zářením

Nositelem tepla jsou elektromagnetické vlny, při přenosu tepla není nutné hmotné prostředí. Výkon tělesa je dle Stefanova-Boltzmannova zákona:

$$P = \sigma \varepsilon S T^4, \quad [\text{W}] \quad (4.7)$$

kde P je výkon záření, σ je Stefan-Boltzmannova konstanta, ε je emisivita, S je povrch tělesa a T je termodynamická teplota.

V modelu stavební části místnosti byl použit pouze přenos tepla vedením, protože tento druh přenosu se uplatňuje v největší míře. Šíření tepla prouděním se reálně vyskytuje na rozhraní stavební konstrukce a vzduchu v místnosti nebo u otopného tělesa, které je v modelu pro zjednodušení zastoupeno ideálním zdrojem tepla. Pomocí přenosu tepla zářením je možné modelovat tepelné zisky ze slunečního záření. Tyto druhy přenosu tepla by bylo možné použít při případném zpřesňování modelu.

5. Matlab/Simulink, Simscape

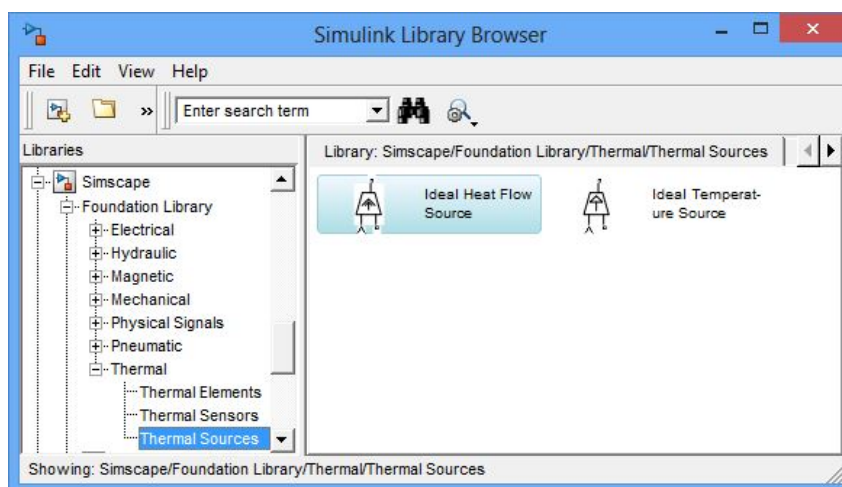
V této práci je použito rozšíření Simscape pro Simulink. Simscape je sada knihoven bloků pro Simulink, která je určená k modelování fyzikálních systémů[17]. Simscape pracuje s Physical Network approach („přístup k fyzikální síti“), který se používá k propojování modelů fyzikálních bloků. Propojení bloků na fyzikální síti nemají určen směr a mají určeny fyzikální jednotky, což jsou největší rozdíly oproti Simulinku.

Mezi knihovny obsažené v rozšíření Simscape patří například:

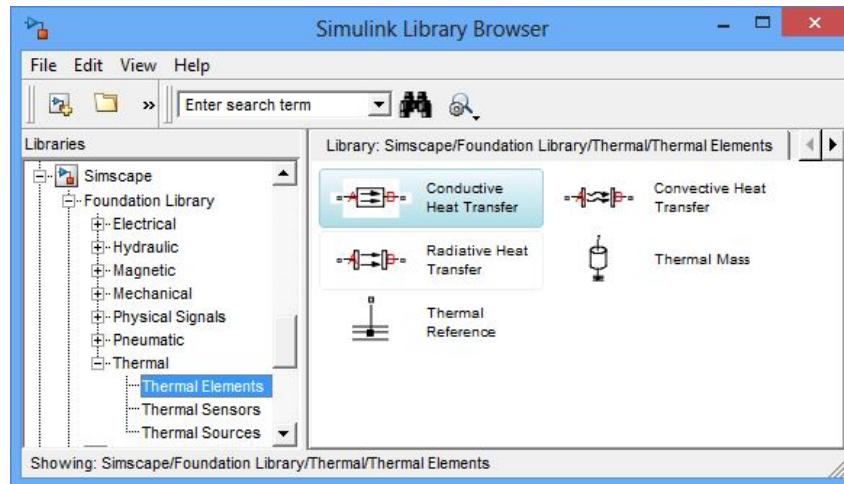
- Foundation Library
 - Electrical
 - Hydraulic
 - Magnetic
 - Mechanical
 - Physical Signals
 - Pneumatic
 - Thermal
- SimHydraulics
- SimMechanics
- SimPowerSystems
- Utilities

V modelu místnosti jsou použity bloky z knihoven Foundation Library (Physical Signals, Thermal) a Utilities. V knihovně Utilities jsou bloky pro převod signálu Simulink na fyzikální síť a naopak. V části Foundation Library Physical Signals jsou matematické a jiné bloky pro použití na fyzikální síti (např. Gain, Product, Integrator a další). Části Thermal je věnována následující část této kapitoly.

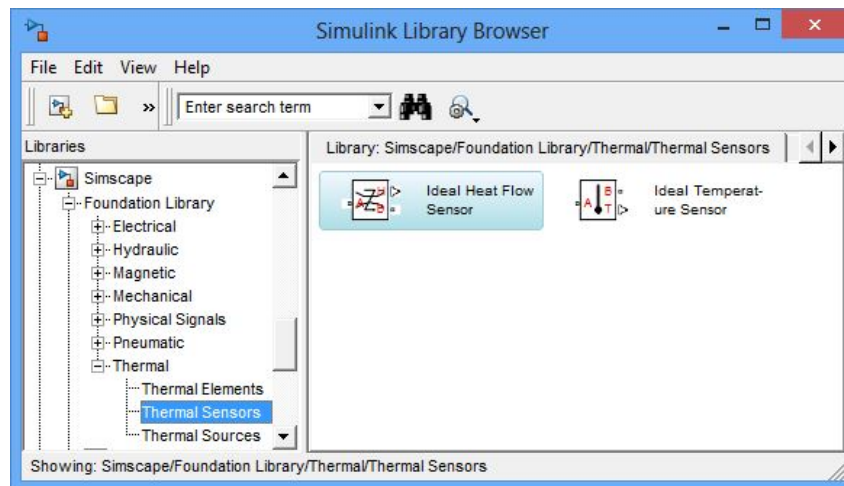
Část Thermal z Foundation Library obsahuje zdroje tepla a teploty (Thermal Sources), tepelné prvky (Thermal Elements) a tepelné senzory (Thermal Sensors).



Obrázek 5.1: Thermal Sources v Simscape



Obrázek 5.2: Thermal Elements v Simscape



Obrázek 5.3: Thermal Sensors v Simscape

Conductive Heat Transfer je blok, pomocí kterého je možné modelovat přenos tepla vedením vrstvou určitého materiálu. Jeho parametry jsou Area (plocha), Thickness (tloušťka) a Thermal conductivity (tepelná vodivost).

Pomocí bloku Thermal Mass je možné modelování tepelných kapacit v jednotlivých tělesech. Jeho parametry jsou Mass (hmota), Specific heat (měrná tepelná kapacita) a Initial temperature (počáteční teplota). Thermal Mass se na fyzikální síť připojuje pouze jedním portem, kterým může být teplo dodáváno i odebíráno.

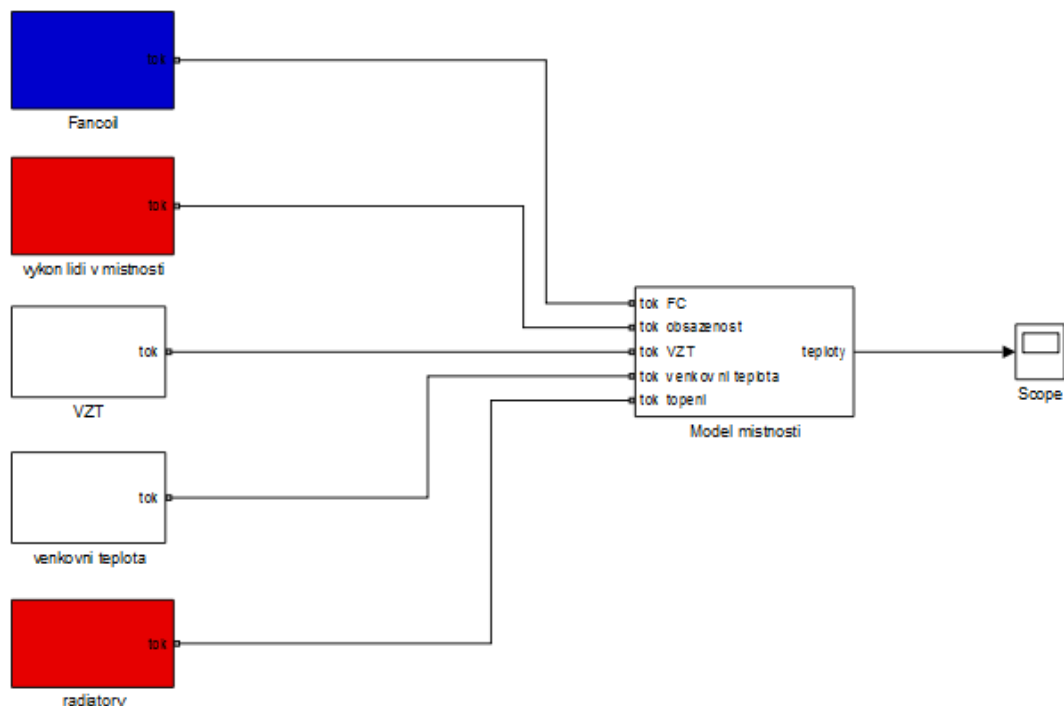
Ideal Temperature Sensor je blok, pomocí něhož je možné měřit teplotu v kterékoliv části modelu. Parametry nemá žádné, avšak je nutné zapojit tři porty (A - měřený bod modelu, B - referenční bod, T - měřená teplota).

Ideal Heat Flow Source umožňuje modelovat zdroj tepelného toku. Není možné nastavit žádné parametry, tepelný tok z tohoto bloku je přímo úměrný vstupnímu signálu.

Pomocí bloku Ideal Temperature Source je možné modelovat externí zdroj teploty. Parametry nemá žádné, tepelný tok je přímo úměrný rozdílu teplot na portech A a B.

6. Tepelný model místnosti

Model místnosti je vytvořen v prostředí Matlab/Simulink s využitím rozšíření Simscape. Celý model pracuje na fyzikální síti (Physical Network), načítání dat a výstupy jsou provedené v základním Simulinku.



Obrázek 6.1: Model místnosti se zdroji tepla a chladu

Při vytváření modelu byly použity následující zdroje dat:

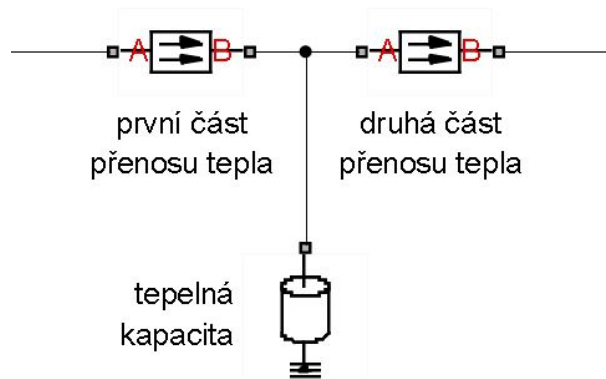
1. Dokumentace skutečného provedení stavby, AVVA Modrá, pavilon A7

Projektová dokumentace, popisující realizaci pavilonu A7. Zejména jsem použil části 01 - Stavební řešení, 04 - Obvodový plášť, 06 - Ústřední topení, 09 - Vzduchotechnika a 13 - Měření a regulace.

2. Databáze Historian

Aby bylo možné získat naměřená historická data, do Historianu byly přidány nově vytvořené trendlogy. Jedná se o teplotu v místnosti, otevření ventilů (chlazení a topení), rychlost ventilátoru fancoilu, teplotu vzduchu přiváděného vzduchotechnikou, provoz vzduchotechniky (zapnuto, vypnuto) a venkovní teplotu. Teploty se ukládají v intervalu 5 minut, otevření ventilů rychlost ventilátoru a provoz VZT podle COV (Change of Value - uložení záznamu při změně o určitou hodnotu, COV Increment).

Z databáze Historian jsou data získávána spuštěním SQL dotazu v programu Microsoft SQL Server Management Studio. Každý trendlog je určen unikátním identifikátorem (TLInstance), změnou tohoto parametru je možné určit, ze kterého trendlogu



Obrázek 6.2: Vrstva stavební konstrukce modelu místnosti

mají být zobrazena data. Druhým parametrem (@DnyMinus) je možné ovlivnit, pro který den mají být zobrazena data. Použitý SQL dotaz je uveden v Příloze 2.

Následně byla data exportována do sešitu MS Excel, ze kterého jsou data načítána do Matlabu. Tabulka má vždy tři sloupce: datum a čas v datovém typu timestamp [18], čas v určeném dni (v sekundách) a vlastní data (teplota, výkon, ...). Problém nastal s rozdílnou interpretací datového typu timestamp v SQL Serveru a v MS Office, byl vyřešen přičítáním dvou dnů v SQL dotazu.

Stavební část modelu je realizována rozložením stavebních konstrukcí na jednotlivé části (vrstvy), které jsou modelovány samostatně a následně propojeny pomocí fyzikální sítě. Komplexní analytické řešení by bylo početně příliš náročné, proto byl zvolen tento postup. Pro zvýšení přesnosti modelu by bylo možné jednotlivé vrstvy dále dělit na tenčí.

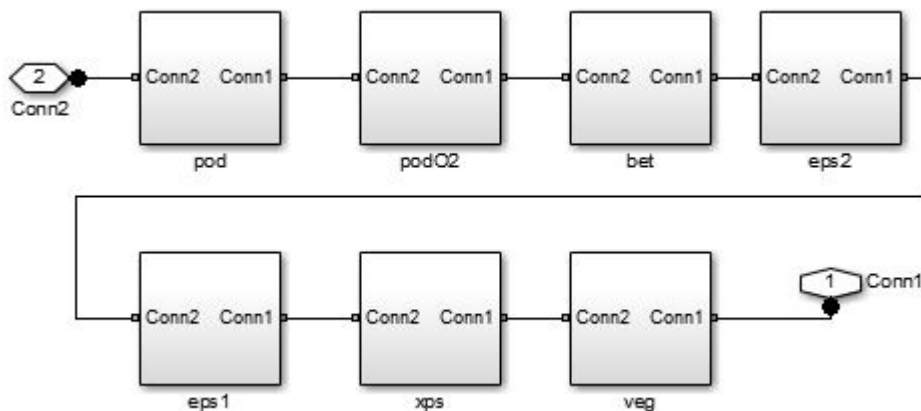
Pro každou část stavební konstrukce (stěny, strop, podlaha, okna, dveře atd.) bylo z projektové dokumentace zjištěno její složení. Následně byla k těmto vrstvám doplněna objemová hustota, měrná tepelná kapacita a součinitel tepelné vodivosti [19]. Tato data byla upravena do tabulek, které jsou v příloze 1.

Základním stavebním kamenem této části modelu jsou dva bloky Conductive Heat Transfer a jeden blok Thermal Mass (viz obr. 6.2). Tím je tvořena jedna vrstva stavební konstrukce. Fyzická tloušťka této vrstvy je rozdělena mezi dva bloky Conductive Heat Transfer, mezi kterými je zapojen blok Thermal Mass. Tím je do modelu vnesena jistá nepřesnost (tepelná kapacita reálně není soustředěna uprostřed vrstvy, ale rovnoměrně v celém objemu), avšak na kvalitu modelu má toto zjednodušení zanedbatelný vliv.

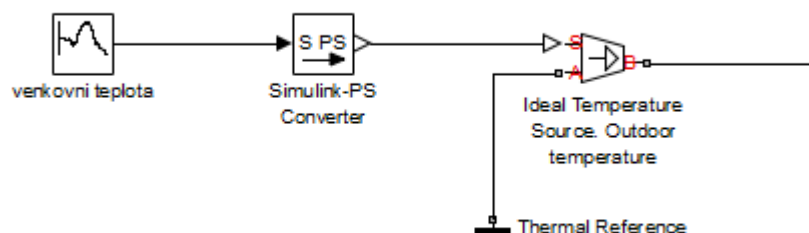
Ze tří zmíněných bloků je vytvořen subsystém, aby byl model přehlednější. Jednotlivé vrstvy (subsystémy) jsou následně mezi sebou propojeny a je z nich vytvořena část stavební konstrukce. Na obrázku 6.3 je vidět model stropu místnosti.

Část stavební konstrukce je vždy na jedné straně připojena k bloku Thermal Mass, který reprezentuje vzduch v modelované místnosti. Na druhé straně je připojena buď venkovní teplota (jako zdroj tepelného toku), nebo tepelná kapacita vzduchu v okolních místnostech (Thermal Mass).

Venkovní teplota je modelována pomocí bloku Ideal Temperature Source a řídicí signál je realizován pomocí Repeating Sequence Interpolated. Data do tohoto bloku jsou načí-



Obrázek 6.3: Model části stavební konstrukce - strop



Obrázek 6.4: Model venkovní teploty

tána ze souboru MS Excel, průběh teploty mimo okamžiky vzorkování je určen metodou „Interpolating-Use End Values“. Zapojení bloků modelu venkovní teploty je na obr. 6.4.

Vliv vzduchotechniky (VZT) na teplotu v místnosti je modelován opět pomocí bloků Repeating Sequence Interpolated, které jsou použity jako zdroj signálu teploty přiváděného vzduchu a provozu vzduchotechniky. Teplo dodané vzduchu v místnosti je možné určit z rovnice:

$$Q_{VZT} = C(T_f - T_i), \quad (6.1)$$

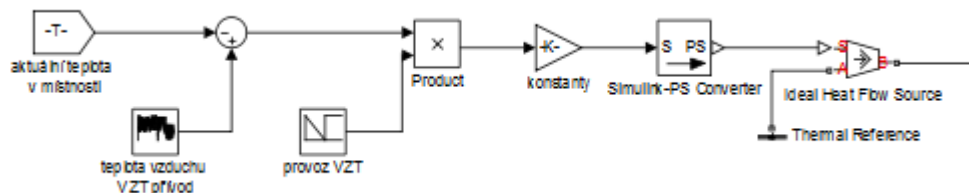
$$Q_{VZT} = cm(T_{VZT} - T_{mist}), \quad (6.2)$$

$$Q_{VZT} = c\rho V(T_{VZT} - T_{mist}), \quad (6.3)$$

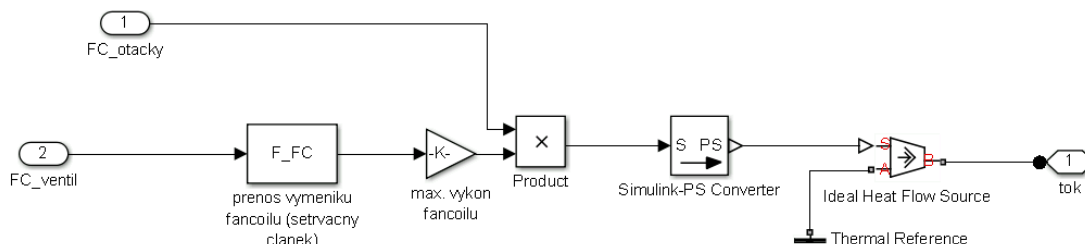
kde Q_{VZT} je teplo dodávané VZT jednotkou, C je tepelná kapacita vzduchu v místnosti, c je měrná tepelná kapacita vzduchu, m je hmotnost vzduchu v místnosti, ρ je objemová hustota vzduchu, V je objem místnosti, T_{VZT} je teplota vzduchu přiváděného do místnosti a T_{mist} je teplota vzduchu v místnosti.

Podle rovnice 6.3 je zapojen model na obr. 6.5, navíc je v modelu zohledněn provozní stav VZT (vypnuta, zapnuta) a jsou přidány bloky pro převod na fyzikální síť Simscape.

Základními bloky modelu fancoilu jsou opět Ideal Heat Flow Source a Repeating Sequence Interpolated, které jsou doplněny o LTI System a Product. Repeating Sequence Interpolated se používá jako zdroj dat načítaných z Excelu.



Obrázek 6.5: Model vlivu vzduchotechniky na modelovanou místnost



Obrázek 6.6: Model fancoilu

Tabulka 6.1: Korekční faktor vlivu otáček ventilátoru fancoilu na jeho výkon

Otáčky	Celkový výkon	Čitelný výkon
Vysoké	1,00	1,00
Střední	0,75	0,61
Nízké	0,73	0,58

Tepelný výměník ve fancoilu má určitou setrvačnost, proto je v modelu reprezentován setrvačným článkem prvního řádu s časovou konstantou 300 sekund

$$F(p) = \frac{1}{300p + 1}. \quad (6.4)$$

Ventilátor fancoilu má možnost volby otáček (nízké, střední, vysoké), dle [6] je vliv otáček na výkon fancoilu popsán v tabulce 6.1. Aktuální výkon fancoilu je tedy součinem míry otevření ventilu, korekčního faktoru otáček ventilátoru a maximálního výkonu fancoilu. Následně je tento výkon převeden pomocí bloku Simulink-PS Converter převeden na tepelný tok ve fyzikální síti Simscape.

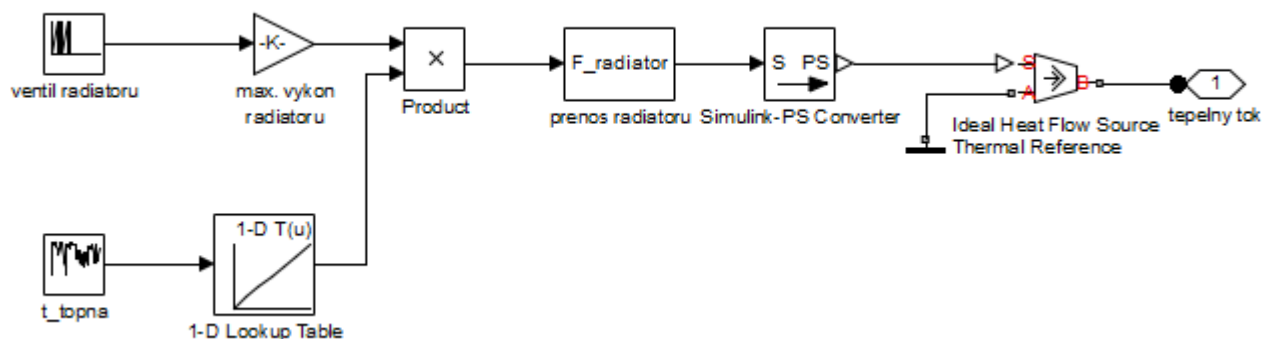
Otopná tělesa jsou modelována jako setrvačný členek prvního řádu s dopravním zpožděním

$$F(p) = \frac{e^{-200p}}{800p + 1}. \quad (6.5)$$

Výkon otopných těles je řízen pomocí elektrotermických ventilů. Data o jejich stavu v čase jsou načítána z tabulky souboru Excel do bloku Repeating Sequence Interpolated. Tato data jsou ve formátu ventilu otevřeno, zavřeno (1;0). Ventily jsou řízeny pulsně šířkovou modulací (PWM), proto jsou výsledné grafy mírně nepřehledné („vyplněná“ plocha

6.1. POROVNÁNÍ MODELOVANÝCH PRŮBĚHŮ TEPLOTY SE SKUTEČNÝMI

znamená opakované otevírání a zavírání ventilů). Výkon otopných těles je závislý i na teplotě topné vody, toto je řešeno pomocí bloku 1-D Lookup Table. Teplota topné vody je načítána z tabulky v Excelu do bloku Repeating Sequence Interpolated, který je zdrojem signálu pro 1-D Lookup Table. Aktuální výkon otopných těles je tedy součinem logické polohy ventilu (0;1), maximálního výkonu otopných těles a korekce teploty topné vody. Tento výkon je převeden na signál na fyzikální síti a ten je jako zdroj tepelného toku připojen k modelu místnosti.



Obrázek 6.7: Model otopných těles

Kromě již popsaných tepelných zdrojů je v modelu zanesen i vliv zařízení v místnosti a přítomných osob. Na první pohled se tento vliv jevil jako porucha, která působila na model, avšak tato porucha vykazovala značně pravidelné chování (výskyt v pracovní době). Proto byl do modelu přidán další zdroj tepla, který reprezentuje tepelné působení zařízení (počítačů,...) a osob v místnosti.

6.1. Porovnání modelovaných průběhů teploty se skutečnými

V této kapitole jsou porovnány průběhy skutečně naměřené a modelované teploty. Teplotní průběh je vždy doplněn tím zdrojem tepla/chladu, který měl v zobrazeném období na teplotu v místnosti největší vliv. Grafy pro ostatní zdroje tepla/chladu a i pro jiné dny jsou v příloze 4.

Na obrázcích 6.8 a 6.9 jsou průběhy ze 24. října 2012. V této době bylo potřeba ještě chladit, ne však kvůli venkovní teplotě, ale kvůli tepelným ziskům v rámci místnosti (lidé, vybavení,...). Žádaná hodnota teploty byla nastavena na 23 °C, měřená i modelovaná teplota se pohybují v okolí této hodnoty. Mezi průběhy měřené a modelované teploty jsou menší odchylky, většinou však méně než 0,5 °C.

Obrázky 6.10 a 6.11 ukazují průběhy měřených veličin ze dne 28. října 2012. V tomto dni teplotu v místnosti ovlivňovala zejména vzduchotechnika a venkovní teplota (fancoil ani otopná tělesa nebyly využity). Na obrázku 6.10 (kolem 10. hodiny) je zřetelně vidět působení vzduchotechniky, průběhy měřené a modelované teploty jsou téměř shodné. V obrázku 6.11 je zachycen provoz VZT tak, že pokud je VZT jednotka vypnutá, průběh

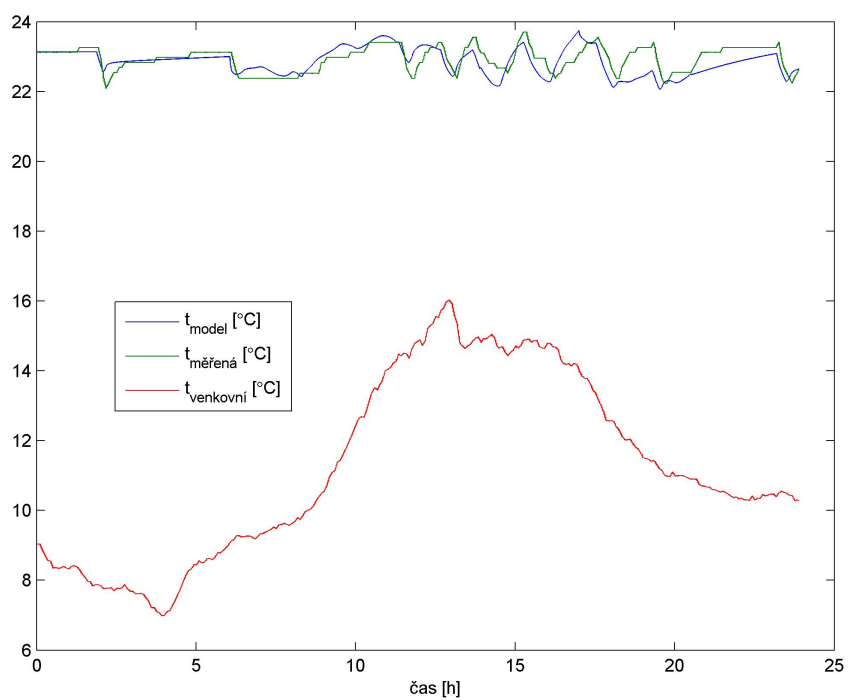
6.1. POROVNÁNÍ MODELOVANÝCH PRŮBĚHŮ TEPLOTY SE SKUTEČNÝMI

má hodnotu 0, pokud je zapnutá, tak průběh odpovídá teplotě dodávané VZT jednotkou do místnosti.

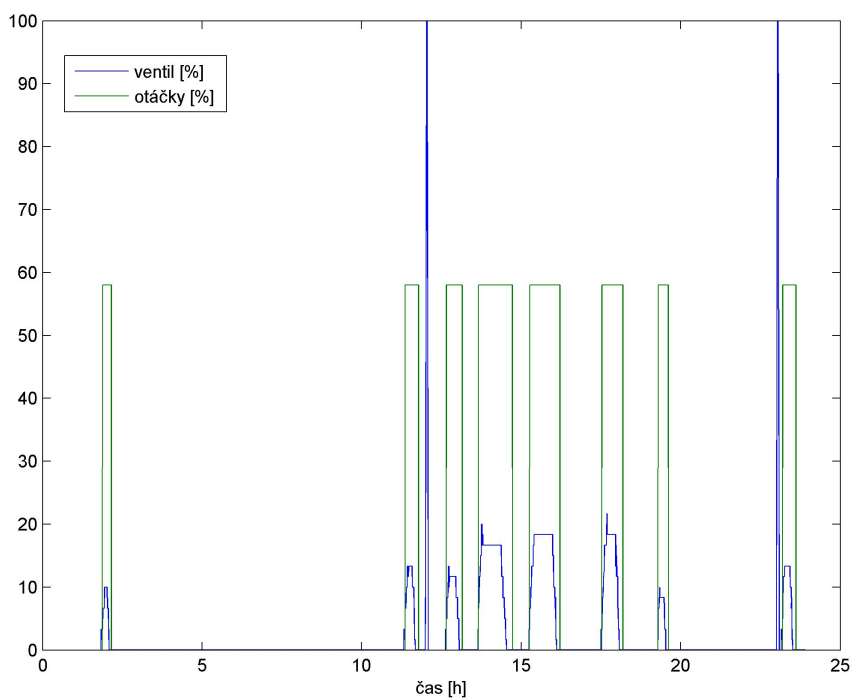
Poslední dvojice obrázků (6.12 a 6.13) ukazuje vliv otopných těles na teplotu v místnosti. Data jsou z 25. listopadu 2012, v tomto dni teplotu v místnosti nejvíce ovlivňovala otopná tělesa (menší vliv měla i VZT, lidé a zařízení v místnosti, fancoil nebyl v provozu). Průběhy měřené a modelované teploty jsou téměř totožné, maximální odchylka (cca 0,3 °C) se blíží přesnosti snímače teploty (kapitola 3.2).

Model byl ověřován na výrazně větším vzorku časových intervalů, ve výše uvedených intervalech jsou velmi dobře vidět vlivy jednotlivých zdrojů tepla/chladu, proto byly vybrány do textové části této práce. Další průběhy modelovaných i měřených veličin je možné nalézt v příloze 4.

6.1. POROVNÁNÍ MODELOVANÝCH PRŮBĚHŮ TEPLOTY SE SKUTEČNÝMI

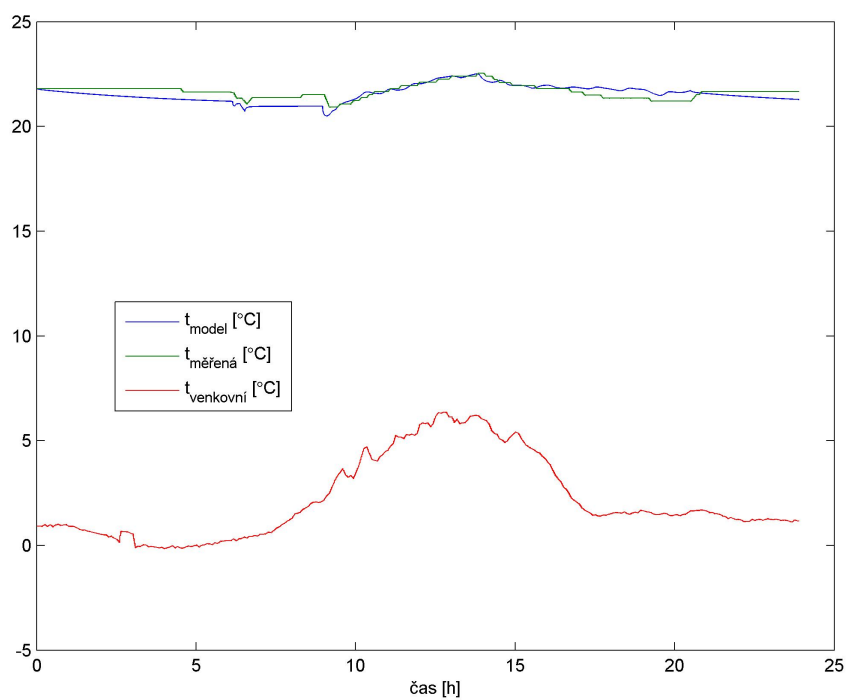


Obrázek 6.8: Průběh teploty v místnosti 24.10.2012

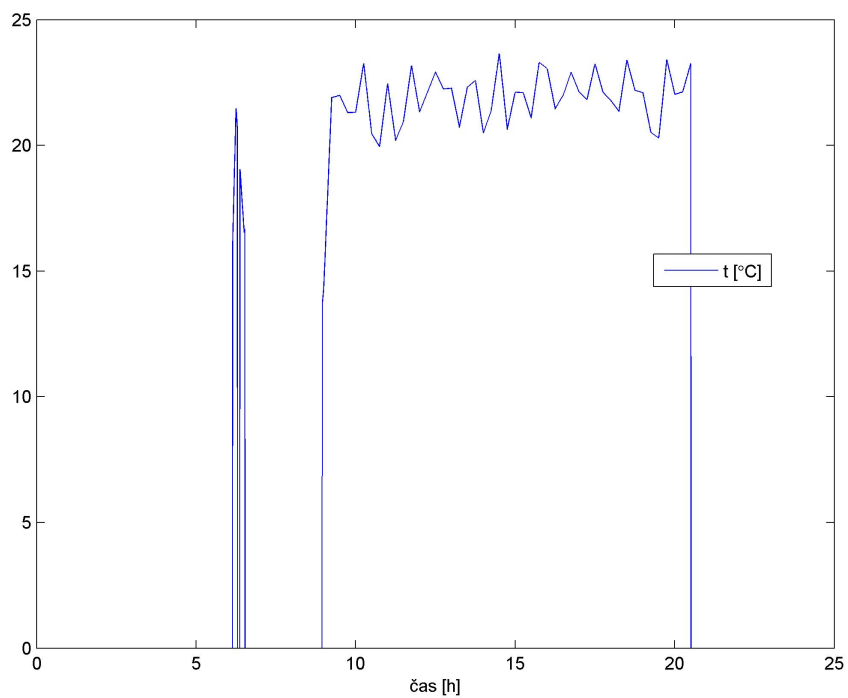


Obrázek 6.9: Provoz fancoilu 24.10.2012

6.1. POROVNÁNÍ MODELOVANÝCH PRŮBĚHŮ TEPLOTY SE SKUTEČNÝMI

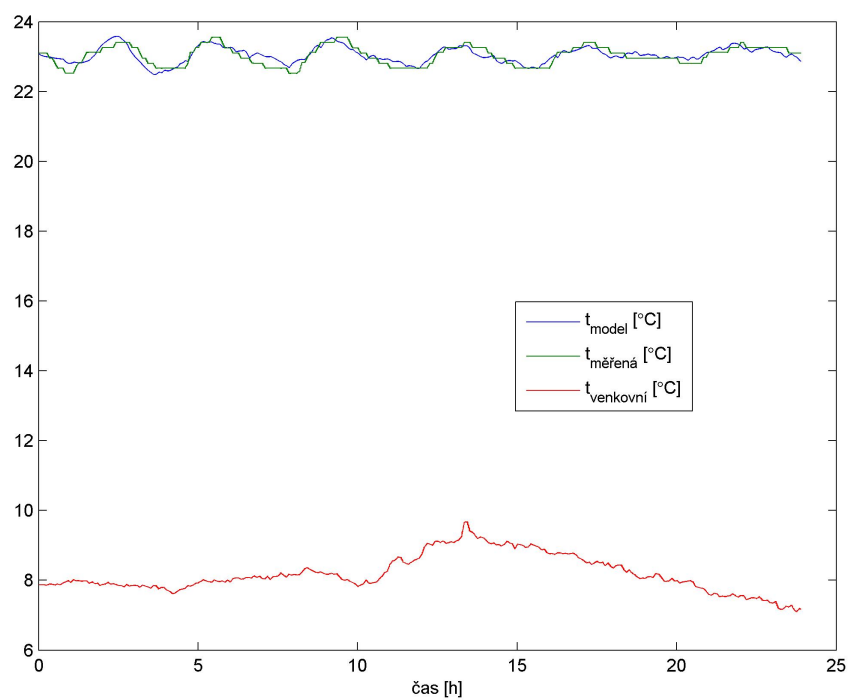


Obrázek 6.10: Průběh teploty v místnosti 28.10.2012

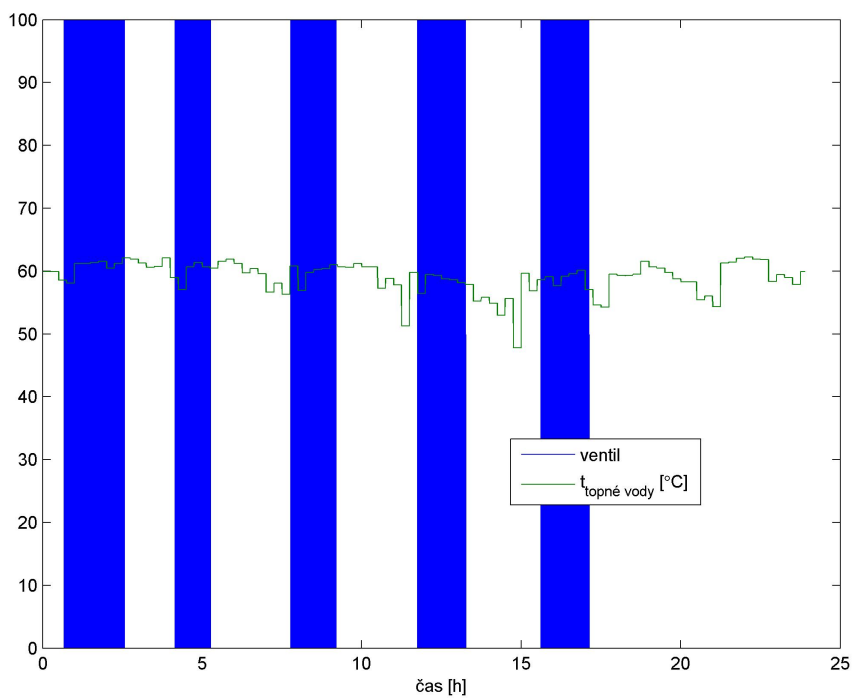


Obrázek 6.11: Průběh teploty vzduchu dodávaného vzduchotechnikou dne 28.10.2012

6.1. POROVNÁNÍ MODELOVANÝCH PRŮBĚHŮ TEPLOTY SE SKUTEČNÝMI



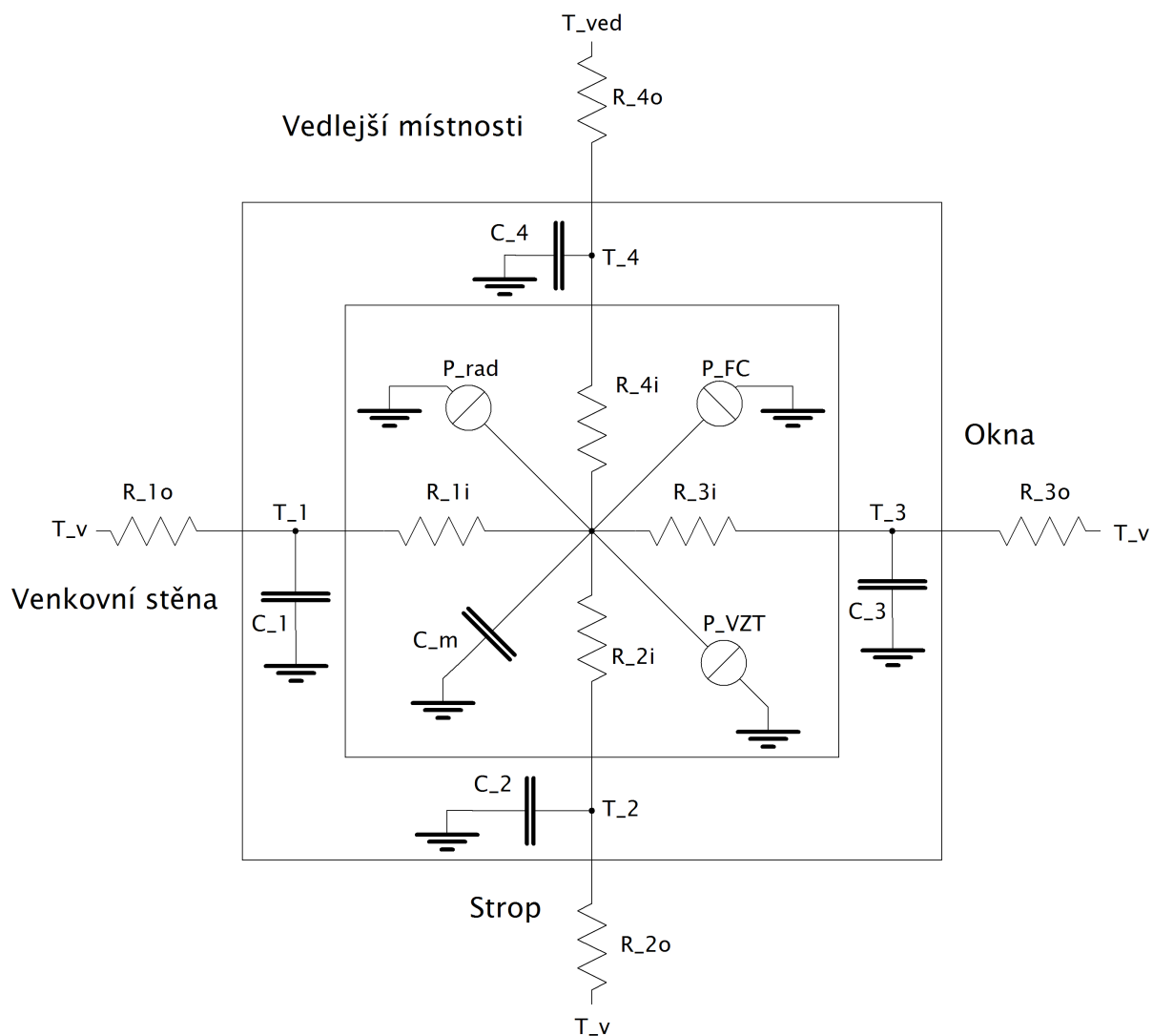
Obrázek 6.12: Průběh teploty v místnosti 25.11.2012



Obrázek 6.13: Průběh provozu otopných těles a teploty topné vody 25.11.2012

6.2. Úprava tepelného modelu místnosti pro návrh regulátorů

Pro návrh MPC (model predictive control) regulátorů bylo nutné model využívající komponenty Simulink Simscape výrazně zjednodušit. Původní model obsahoval řádově stovky stavových proměnných, což znemožňovalo jeho použití pro návrh regulátorů. Zjednodušení spočívá ve sloučení vrstev stavebních konstrukcí, každá z nich je nově modelována jako tepelná kapacita a dva tepelné odpory. Dále byl zanedbán vliv zařízení a osob na teplotu v místnosti, jelikož tento vliv není možné měřit a je pouze obtížně předvídatelný.



Obrázek 6.14: Náhradní schéma místnosti

Přenos fancoilu je

$$F(p) = \frac{1}{300p + 1}, \quad (6.6)$$

6.2. ÚPRAVA TEPELNÉHO MODELU MÍSTNOSTI PRO NÁVRH REGULÁTORŮ

stavový popis tedy je

$$\frac{dx_{FC}(t)}{dt} = \frac{1}{16}V_{FC}(t) - \frac{x_{FC}(t)}{300}, \quad (6.7)$$

$$y_{FC}(t) = \frac{4}{75}x_{FC}(t), \quad (6.8)$$

kde x_{FC} je stav fancoilu, V_{FC} je vstup - míra otevření ventilu fancoilu a y_{FC} je výstup fancoilu.

Přenos otopného tělesa je

$$F(p) = \frac{e^{-200p}}{800p + 1}. \quad (6.9)$$

z toho určený stavový popis

$$\frac{dx_{rad}(t)}{dt} = \frac{1}{32}V_{rad}(t - 200) - \frac{x_{rad}(t)}{800}, \quad (6.10)$$

$$y_{rad}(t) = \frac{1}{25}x_{rad}(t), \quad (6.11)$$

kde x_{rad} je stav radiátoru, V_{rad} je vstup - míra otevření ventilu radiátoru a y_{FC} je výstup radiátoru.

Stavové rovnice jsou tedy ve tvaru:

$$\frac{d}{dt}T_1(t) = \frac{1}{C_1} \left(\frac{T_v - T_1}{R_{1o}} + \frac{T_m - T_1}{R_{1i}} \right), \quad (6.12)$$

$$\frac{d}{dt}T_2(t) = \frac{1}{C_2} \left(\frac{T_v - T_2}{R_{2o}} + \frac{T_m - T_2}{R_{2i}} \right), \quad (6.13)$$

$$\frac{d}{dt}T_3(t) = \frac{1}{C_3} \left(\frac{T_v - T_3}{R_{3o}} + \frac{T_m - T_3}{R_{3i}} \right), \quad (6.14)$$

$$\frac{d}{dt}T_4(t) = \frac{1}{C_4} \left(\frac{T_{ved} - T_4}{R_{4o}} + \frac{T_m - T_4}{R_{4i}} \right), \quad (6.15)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}T_m(t) = \frac{1}{C_m} & \left(\frac{T_1 - T_m}{R_{1i}} + \frac{T_2 - T_m}{R_{2i}} + \frac{T_3 - T_m}{R_{3i}} + \frac{T_4 - T_m}{R_{4i}} \right) \\ & - \frac{P_{FC}}{C_m} \frac{4x_{FC}(t)}{75} + \frac{P_{rad}}{C_m} \frac{x_{rad}(t)}{25} + \frac{C_{VZT}}{C_m} (T_{VZT} - T_m), \end{aligned} \quad (6.16)$$

kde T je teplota, R je tepelný odpor a C je tepelná kapacita. Indexy mají následující význam: 1 ... venkovní stěna, 2 ... stropní konstrukce, 3 ... okno, VZT ... vzduchotechnika, 4 ... vnitřní stěny, ved ... souhrn vedlejších místností.

Tepelné odpory jednotlivých konstrukcí byly určeny ze vztahů

$$R_{ni} = \frac{\frac{d}{2}}{kS}, \quad (6.17)$$

$$R_{no} = \frac{\frac{d}{2}}{kS}, \quad (6.18)$$

6.2. ÚPRAVA TEPELNÉHO MODELU MÍSTNOSTI PRO NÁVRH REGULÁTORŮ

kde R_{ni} je vnitřní část tepelného odporu dané konstrukce, R_{no} je vnější část tepelného odporu dané konstrukce, d je tloušťka konstrukce, k je tepelná vodivost a S je plocha konstrukce.

Pro zjednodušení zápisu stavových rovnic byly zavedeny substituce:

$$\frac{1}{R_i} = \frac{1}{R_{1i} + R_{2i} + R_{3i} + R_{4i}}, \quad (6.19)$$

$$\frac{1}{R_{Tn}} = \frac{1}{R_{no}} + \frac{1}{R_{ni}}. \quad (6.20)$$

Stavové rovnice byly následně upraveny do maticového tvaru:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x}(t) = \mathbf{A} \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \mathbf{u}(t), \quad (6.21)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C} \mathbf{x}(t) + \mathbf{D} \mathbf{u}(t). \quad (6.22)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} T_1(t) \\ T_2(t) \\ T_3(t) \\ T_4(t) \\ T_m(t) \\ x_{FC}(t) \\ x_{rad}(t) \end{pmatrix} = & \begin{pmatrix} -\frac{1}{C_1 R_{T1}} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_1 R_{1i}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_2 R_{T2}} & 0 & 0 & \frac{1}{C_2 R_{2i}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{C_3 R_{T3}} & 0 & \frac{1}{C_3 R_{3i}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C_4 R_{T4}} & \frac{1}{C_4 R_{4i}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_m R_{1i}} & \frac{1}{C_m R_{2i}} & \frac{1}{C_m R_{3i}} & \frac{1}{C_m R_{4i}} & -\frac{1}{C_m R_i} - \frac{C_{VZT}}{C_m} & -\frac{4P_{FC}}{75C_m} & \frac{P_{rad}}{25C_m} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{300} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{800} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1(t) \\ T_2(t) \\ T_3(t) \\ T_4(t) \\ T_m(t) \\ x_{FC}(t) \\ x_{rad}(t) \end{pmatrix} \\ & + \begin{pmatrix} \frac{1}{C_1 R_{1o}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_2 R_{2o}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_3 R_{3o}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_4 R_{4o}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{VZT}}{C_m} & 0 \\ 0 & \frac{1}{16} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{32} & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_v(t) \\ V_{FC}(t) \\ V_{rad}(t - 200) \\ T_{VZT}(t) \\ T_{ved}(t) \end{pmatrix}, \quad (6.23) \end{aligned}$$

$$y(t) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1(t) \\ T_2(t) \\ T_3(t) \\ T_4(t) \\ T_m(t) \\ x_{FC}(t) \\ x_{rad}(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_v \\ V_{FC} \\ V_{rad} \\ T_{VZT} \\ T_{ved}(t) \end{pmatrix}. \quad (6.24)$$

Pro potřeby návrhu MPC regulátoru byl model upraven tak, že poruchy (venkovní teplota, teplota vedlejších místností a teplota vzduchu přiváděného vzduchotechnikou) se v modelu vyskytují jako stavy, jejichž derivace je nulová (stav se tedy v čase nemění). Také bylo nutné upravit model tak, aby se v něm nevyskytovalo dopravní zpoždění, které bylo nesprávně použito v modelu Simscape (ve skutečnosti se v přenosu míry otevření ventilu na teplotu v místnosti dopravní zpoždění nevyskytuje, jedná se o dynamiku ventilu - doba otevření je dle katalogového listu ventilu cca 3 minuty):

$$F(p) = \frac{1}{(800p + 1)(200p + 1)}, \quad (6.25)$$

a výsledné stavové rovnice jsou

$$\frac{d}{dt}T_1(t) = \frac{1}{C_1} \left(\frac{T_v - T_1}{R_{1o}} + \frac{T_m - T_1}{R_{1i}} \right), \quad (6.26)$$

$$\frac{d}{dt}T_2(t) = \frac{1}{C_2} \left(\frac{T_v - T_2}{R_{2o}} + \frac{T_m - T_2}{R_{2i}} \right), \quad (6.27)$$

$$\frac{d}{dt}T_3(t) = \frac{1}{C_3} \left(\frac{T_v - T_3}{R_{3o}} + \frac{T_m - T_3}{R_{3i}} \right), \quad (6.28)$$

$$\frac{d}{dt}T_4(t) = \frac{1}{C_4} \left(\frac{T_{ved} - T_4}{R_{4o}} + \frac{T_m - T_4}{R_{4i}} \right), \quad (6.29)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}T_m(t) = & \frac{1}{C_m} \left(\frac{T_1 - T_m}{R_{1i}} + \frac{T_2 - T_m}{R_{2i}} + \frac{T_3 - T_m}{R_{3i}} + \frac{T_4 - T_m}{R_{4i}} \right) \\ & - \frac{P_{FC}}{C_m} \frac{4x_{FC}(t)}{75} + \frac{P_{rad}}{C_m} \frac{32x_{rad2}(t)}{625} + \frac{C_{VZT}}{C_m} (T_{VZT} - T_m), \end{aligned} \quad (6.30)$$

$$\frac{d}{dt}x_{FC}(t) = \frac{1}{16}V_{FC}(t) - \frac{x_{FC}(t)}{300}, \quad (6.31)$$

$$\frac{d}{dt}x_{rad1}(t) = \frac{1}{16}V_{rad}(t) - \frac{x_{rad1}(t)}{160} - \frac{2x_{rad2}(t)}{625}, \quad (6.32)$$

$$\frac{d}{dt}x_{rad2}(t) = \frac{x_{rad1}(t)}{512}, \quad (6.33)$$

$$\frac{d}{dt}T_{VZT}(t) = 0, \quad (6.34)$$

$$\frac{d}{dt}T_v(t) = 0, \quad (6.35)$$

6.2. ÚPRAVA TEPELNÉHO MODELU MÍSTNOSTI PRO NÁVRH REGULÁTORŮ

a zapsané v maticovém tvaru:

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} T_1(t) \\ T_2(t) \\ T_3(t) \\ T_4(t) \\ T_m(t) \\ x_{FC}(t) \\ x_{rad1}(t) \\ x_{rad2}(t) \\ T_{VZT}(t) \\ T_v(t) \\ T_{ved}(t) \end{pmatrix} = & \begin{pmatrix} -\frac{1}{C_1 R_{T1}} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_1 R_{1i}} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_1 R_{1o}} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_2 R_{T2}} & 0 & 0 & \frac{1}{C_2 R_{2i}} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_2 R_{2o}} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{C_3 R_{T3}} & 0 & \frac{1}{C_3 R_{3i}} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_3 R_{3o}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C_4 R_{T4}} & \frac{1}{C_4 R_{4i}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_4 R_{4o}} \\ \frac{1}{C_m R_{1i}} & \frac{1}{C_m R_{2i}} & \frac{1}{C_m R_{3i}} & \frac{1}{C_m R_{4i}} & -\frac{1+C_{VZT}R_i}{C_m R_i} & -\frac{4P_{FC}}{75C_m} & 0 & \frac{32P_{rad}}{625C_m} & \frac{C_{VZT}}{C_m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{300} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{160} & -\frac{2}{625} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{512} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\
& \begin{pmatrix} T_1(t) \\ T_2(t) \\ T_3(t) \\ T_4(t) \\ T_m(t) \\ x_{FC}(t) \\ x_{rad1}(t) \\ x_{rad2}(t) \\ T_{VZT}(t) \\ T_v(t) \\ T_{ved}(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{16} & 0 \\ 0 & \frac{1}{16} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{FC}(t) \\ V_{rad}(t) \end{pmatrix}, \quad (6.36)
 \end{aligned}$$

$$y(t) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1(t) \\ T_2(t) \\ T_3(t) \\ T_4(t) \\ T_m(t) \\ x_{FC}(t) \\ x_{rad1}(t) \\ x_{rad2}(t) \\ T_{VZT}(t) \\ T_v(t) \\ T_{ved}(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{FC} \\ V_{rad} \end{pmatrix}. \quad (6.37)$$

Následně bylo řízení teploty v místnosti rozděleno do dvou oblastí, topení v rozmezí $10 - 22^\circ\text{C}$ a chlazení $23,5 - 35^\circ\text{C}$. Podle tohoto rozdělení byl upraven a tím i zjednodušen model tak, že pro každou oblast vznikl samostatný model, který obsahuje akční veličinu odpovídající oblasti řízení (ventil radiátoru pro oblast topení a ventil fancoilu pro oblast chlazení).

MPC regulátor funguje obdobně jako stavový regulátor s proporcionálními zpětnými vazbami, nedokáže tedy vyregulovat působící poruchu na nulovou ustálenou odchylku. Aby bylo možné poruchu vyregulovat, je nutné aby regulátor (nebo přenos otevřené smyčky) obsahoval integrátor (sumátor). Toho je možné dosáhnout úpravou modelu pro návrh regulátoru, byl přidán integrátor na vstup soustavy modelu. V reálném systému se tento integrátor nevyskytuje, je tedy nutné jej přidat na výstup regulátoru. Tím byla změněna vstupní veličina modelu systému, místo míry otevření ventilu je vstupem modelu systému změna otevření ventilu. Algoritmus pro výpočet regulátoru počítá s astatismem v soustavě a tím je zajištěno vyregulování poruchy.

6.2. ÚPRAVA TEPELNÉHO MODELU MÍSTNOSTI PRO NÁVRH REGULÁTORŮ

Model pro vytápění - s úpravou vstupní veličiny

Vyloučením vlivu fancoilu byl vytvořen model pro návrh regulátoru otopného tělesa

$$\frac{d}{dt}T_1(t) = \frac{1}{C_1} \left(\frac{T_v - T_1}{R_{1o}} + \frac{T_m - T_1}{R_{1i}} \right), \quad (6.38)$$

$$\frac{d}{dt}T_2(t) = \frac{1}{C_2} \left(\frac{T_v - T_2}{R_{2o}} + \frac{T_m - T_2}{R_{2i}} \right), \quad (6.39)$$

$$\frac{d}{dt}T_3(t) = \frac{1}{C_3} \left(\frac{T_v - T_3}{R_{3o}} + \frac{T_m - T_3}{R_{3i}} \right), \quad (6.40)$$

$$\frac{d}{dt}T_4(t) = \frac{1}{C_4} \left(\frac{T_{ved} - T_4}{R_{4o}} + \frac{T_m - T_4}{R_{4i}} \right), \quad (6.41)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}T_m(t) = \frac{1}{C_m} \left(\frac{T_1 - T_m}{R_{1i}} + \frac{T_2 - T_m}{R_{2i}} + \frac{T_3 - T_m}{R_{3i}} + \frac{T_4 - T_m}{R_{4i}} \right) \\ + \frac{P_{rad}}{C_m} \frac{32x_{rad2}(t)}{625} + \frac{C_{VZT}}{C_m} (T_{VZT} - T_m), \end{aligned} \quad (6.42)$$

$$\frac{d}{dt}x_{rad1}(t) = \frac{1}{16}V_{rad}(t) - \frac{x_{rad1}(t)}{160} - \frac{2x_{rad2}(t)}{625}, \quad (6.43)$$

$$\frac{d}{dt}x_{rad2}(t) = \frac{x_{rad1}(t)}{512}, \quad (6.44)$$

$$\frac{d}{dt}T_{VZT}(t) = 0, \quad (6.45)$$

$$\frac{d}{dt}T_v(t) = 0, \quad (6.46)$$

$$\frac{d}{dt}V_{rad}(t) = u_{rad}, \quad (6.47)$$

který byl následně upraven do maticového tvaru

6.2. ÚPRAVA TEPELNÉHO MODELU MÍSTNOSTI PRO NÁVRH REGULÁTORŮ

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} T_1(t) \\ T_2(t) \\ T_3(t) \\ T_4(t) \\ T_m(t) \\ x_{rad1}(t) \\ x_{rad2}(t) \\ T_{VZT}(t) \\ T_v(t) \\ V_{rad}(t) \\ T_{ved}(t) \end{pmatrix} = & \begin{pmatrix} -\frac{1}{C_1 R_{T1}} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_1 R_{1i}} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_1 R_{1o}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_2 R_{T2}} & 0 & 0 & \frac{1}{C_2 R_{2i}} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_2 R_{2o}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{C_3 R_{T3}} & 0 & \frac{1}{C_3 R_{3i}} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_3 R_{3o}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C_4 R_{T4}} & \frac{1}{C_4 R_{4i}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_4 R_{4o}} \\ \frac{1}{C_m R_{1i}} & \frac{1}{C_m R_{2i}} & \frac{1}{C_m R_{3i}} & \frac{1}{C_m R_{4i}} & -\frac{1+C_{VZT} R_i}{C_m R_i} & 0 & \frac{32 P_{rad}}{625 C_m} & \frac{C_{VZT}}{C_m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{160} & -\frac{2}{625} & 0 & 0 & \frac{1}{16} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{512} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\
& \begin{pmatrix} T_1(t) \\ T_2(t) \\ T_3(t) \\ T_4(t) \\ T_m(t) \\ x_{rad1}(t) \\ x_{rad2}(t) \\ T_{VZT}(t) \\ T_v(t) \\ V_{rad}(t) \\ T_{ved}(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} (u_{rad}(t)), \quad (6.48)
 \end{aligned}$$

$$y(t) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1(t) \\ T_2(t) \\ T_3(t) \\ T_4(t) \\ T_m(t) \\ x_{rad1}(t) \\ x_{rad2}(t) \\ T_{VZT}(t) \\ T_v(t) \\ V_{rad}(t) \\ T_{ved}(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{rad}(t) \end{pmatrix}. \quad (6.49)$$

6.2. ÚPRAVA TEPELNÉHO MODELU MÍSTNOSTI PRO NÁVRH REGULÁTORŮ

Model pro chlazení

Vyloučením vlivu otopného tělesa byl vytvořen model pro návrh regulátoru chlazení (fan-coilu)

$$\frac{d}{dt}T_1(t) = \frac{1}{C_1} \left(\frac{T_v - T_1}{R_{1o}} + \frac{T_m - T_1}{R_{1i}} \right), \quad (6.50)$$

$$\frac{d}{dt}T_2(t) = \frac{1}{C_2} \left(\frac{T_v - T_2}{R_{2o}} + \frac{T_m - T_2}{R_{2i}} \right), \quad (6.51)$$

$$\frac{d}{dt}T_3(t) = \frac{1}{C_3} \left(\frac{T_v - T_3}{R_{3o}} + \frac{T_m - T_3}{R_{3i}} \right), \quad (6.52)$$

$$\frac{d}{dt}T_4(t) = \frac{1}{C_4} \left(\frac{T_{ved} - T_4}{R_{4o}} + \frac{T_m - T_4}{R_{4i}} \right), \quad (6.53)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}T_m(t) = \frac{1}{C_m} \left(\frac{T_1 - T_m}{R_{1i}} + \frac{T_2 - T_m}{R_{2i}} + \frac{T_3 - T_m}{R_{3i}} + \frac{T_4 - T_m}{R_{4i}} \right) \\ - \frac{P_{FC}}{C_m} \frac{4x_{FC}(t)}{75} + \frac{C_{VZT}}{C_m} (T_{VZT} - T_m), \end{aligned} \quad (6.54)$$

$$\frac{d}{dt}x_{FC}(t) = \frac{1}{16}V_{FC}(t) - \frac{x_{FC}(t)}{300}, \quad (6.55)$$

$$\frac{d}{dt}T_{VZT}(t) = 0, \quad (6.56)$$

$$\frac{d}{dt}T_v(t) = 0, \quad (6.57)$$

$$\frac{d}{dt}V_{FC}(t) = u_{FC}, \quad (6.58)$$

a zapsaný v maticovém tvaru:

6.2. ÚPRAVA TEPELNÉHO MODELU MÍSTNOSTI PRO NÁVRH REGULÁTORŮ

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} T_1(t) \\ T_2(t) \\ T_3(t) \\ T_4(t) \\ T_m(t) \\ x_{FC}(t) \\ T_{VZT}(t) \\ T_v(t) \\ V_{FC}(t) \\ T_{ved}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{C_1 R_{T1}} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_1 R_{1i}} & 0 & 0 & \frac{1}{C_1 R_{1o}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_2 R_{T2}} & 0 & 0 & \frac{1}{C_2 R_{2i}} & 0 & 0 & \frac{1}{C_2 R_{2o}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{C_3 R_{T3}} & 0 & \frac{1}{C_3 R_{3i}} & 0 & 0 & \frac{1}{C_3 R_{3o}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C_4 R_{T4}} & \frac{1}{C_4 R_{4i}} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_4 R_{4o}} \\ \frac{1}{C_m R_{1i}} & \frac{1}{C_m R_{2i}} & \frac{1}{C_m R_{3i}} & \frac{1}{C_m R_{4i}} & -\frac{1+C_{VZT}R_i}{C_m R_i} & -\frac{4P_{FC}}{75C_m} & \frac{C_{VZT}}{C_m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{300} & 0 & 0 & \frac{1}{16} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1(t) \\ T_2(t) \\ T_3(t) \\ T_4(t) \\ T_m(t) \\ x_{FC}(t) \\ T_{VZT}(t) \\ T_v(t) \\ V_{FC}(t) \\ T_{ved}(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} (u_{FC}(t)), \quad (6.59)$$

$$y(t) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1(t) \\ T_2(t) \\ T_3(t) \\ T_4(t) \\ T_m(t) \\ x_{FC}(t) \\ T_{VZT}(t) \\ T_v(t) \\ V_{FC}(t) \\ T_{ved}(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \end{pmatrix} (u_{FC}(t)). \quad (6.60)$$

6.2. ÚPRAVA TEPELNÉHO MODELU MÍSTNOSTI PRO NÁVRH REGULÁTORŮ

Model pro rekonstrukci stavů

Model pro rekonstrukci stavů pomocí Kalmanova filtru byl vytvořen úpravou rovnic 6.23 a 6.24, obdobně jako v rovnici 6.36 bylo eliminováno dopravní zpoždění. Tento model následně využívají oba MPC regulátory.

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} T_1(t) \\ T_2(t) \\ T_3(t) \\ T_4(t) \\ T_m(t) \\ x_{FC}(t) \\ x_{rad1}(t) \\ x_{rad2}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{C_1 R_{T1}} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_1 R_{1i}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_2 R_{T2}} & 0 & 0 & \frac{1}{C_2 R_{2i}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{C_3 R_{T3}} & 0 & \frac{1}{C_3 R_{3i}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C_4 R_{T4}} & \frac{1}{C_4 R_{4i}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_m R_{1i}} & \frac{1}{C_m R_{2i}} & \frac{1}{C_m R_{3i}} & \frac{1}{C_m R_{4i}} & -\frac{1}{C_m R_i} - \frac{C_{VZT}}{C_m} & -\frac{4P_{FC}}{75C_m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{300} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{512} & -\frac{2}{625} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{512} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1(t) \\ T_2(t) \\ T_3(t) \\ T_4(t) \\ T_m(t) \\ x_{FC}(t) \\ x_{rad1}(t) \\ x_{rad2}(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{C_1 R_{1o}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_2 R_{2o}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_3 R_{3o}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_4 R_{4o}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{C_{VZT}}{C_m} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{16} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{16} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_v(t) \\ V_{FC}(t) \\ T_{VZT}(t) \\ T_{ved}(t) \\ V_{rad}(t) \end{pmatrix}, \quad (6.61)$$

$$y(t) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1(t) \\ T_2(t) \\ T_3(t) \\ T_4(t) \\ T_m(t) \\ x_{FC}(t) \\ x_{rad1}(t) \\ x_{rad2}(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_v \\ V_{FC} \\ T_{VZT} \\ T_{ved}(t) \\ V_{rad}(t) \end{pmatrix}. \quad (6.62)$$

7. Prediktivní regulace

Prediktivní řízení (MPC - Model Predictive Control) je pokročilá metoda regulace, která využívá předem známý model regulované soustavy. V každém kroku řízení je řešena optimalizační úloha, která posuzuje průběh stavové trajektorie, výstupů a akční veličiny na zvoleném predikčním horizontu. Následně je vybrán takový průběh řízení, který nejlépe vyhovuje zvolené účelové funkci. Pro regulaci se použije pouze první akční zásah a v dalším kroku se opět řeší optimalizační úloha a vybírá nejvhodnější průběh řízení. V následujícím textu je tento princip popsán podrobněji. [20] [21]

Mějme regulovaný systém s n stavy, m vstupy a r výstupy, který je popsán stavovými rovnicemi

$$\frac{d}{dt}\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t), \quad (7.1)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t), \quad (7.2)$$

a jeho diskretní verzi s periodou vzorkování T_s

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k), \quad (7.3)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k). \quad (7.4)$$

K tomuto systému můžeme najít vektory predikovaných stavů $\mathbf{X}$ a vstupů $\mathbf{U}$:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{x}_{k+1|k}, \mathbf{x}_{k+2|k}, \dots, \mathbf{x}_{k+N|k})^T, \quad (7.5)$$

$$\mathbf{U} = (\mathbf{u}_{k|k}, \mathbf{u}_{k+1|k}, \dots, \mathbf{u}_{k+N-1|k})^T, \quad (7.6)$$

kde $\mathbf{x}_{k+i|k}$ je predikovaný vstup v čase $k+i$, který získáme působením posloupnosti vstupů $\mathbf{U}$ na daný systém počínaje stavem $\mathbf{x}_{k|k}$. N je horizont predikce (počet kroků, pro které je predikován vývoj systému).

Pro návrh optimálního regulátoru se řeší minimalizace následujícího výrazu:

$$J_N^*(\mathbf{x}(0)) = \min_U \|\mathbf{Q}\mathbf{x}_{k+N|k}\| + \sum_{i=0}^{N-1} \|\mathbf{Q}\mathbf{x}_{k+i|k}\| + \|\mathbf{R}\mathbf{u}_{k+i|k}\|, \quad (7.7)$$

$$\mathbf{x}_{k+i|k} \in \mathbb{X}, \quad (7.8)$$

$$\mathbf{u}_{k+i|k} \in \mathbb{U}, \quad (7.9)$$

kde $\mathbf{Q}$ a $\mathbf{R}$ jsou váhové (penalizační) matice, $\mathbb{X}$ je množina přípustných hodnot stavů a $\mathbb{U}$ je množina přípustných hodnot vstupů.

MPC regulátor využívá pro výpočet akčních zásahů vektor aktuálních stavů. Protože většina stavů není měřitelná, nebo by jejich měření bylo finančně náročné (snímání teploty stěn atd.), je nutné vektor stavů stanovit výpočetně. Samostatný model soustavy není možné použít, protože nemusí přesně odpovídat reálnému systému a na reálnou soustavu působí neměřitelné poruchy. Proto je nutné pro zjištění aktuálních hodnot stavů použít stavový pozorovatel (rekonstruktor).

7.1. Luenbergerův stavový pozorovatel

Stavový pozorovatel pro lineární časově invariantní systémy byl popsán v [22] a [23]. Máme-li reálný diskretní systém popsáný rovnicemi

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k), \quad (7.10)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k), \quad (7.11)$$

a jeho model popsáný rovnicemi

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k), \quad (7.12)$$

$$\hat{\mathbf{y}}(k) = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k), \quad (7.13)$$

můžeme model doplnit o stavový pozorovatel a výsledný model je ve tvaru

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{L}[\mathbf{y}(k) - \hat{\mathbf{y}}(k)] + \mathbf{B}\mathbf{u}(k), \quad (7.14)$$

$$\hat{\mathbf{y}}(k) = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k). \quad (7.15)$$

Úpravou těchto rovnic získáme

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1) = (\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C})\hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{L}\mathbf{y}(k) + (\mathbf{B} - \mathbf{L}\mathbf{D})\mathbf{u}(k), \quad (7.16)$$

$$\hat{\mathbf{y}}(k) = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k). \quad (7.17)$$

Návrh pozorovatele se provádí vhodnou volbou matice $\mathbf{L}$, která se pro systém s jedním výstupem redukuje na sloupcový vektor. Dynamické vlastnosti stavového pozorovatele závisí na pólech pozorovatele, tedy vlastních číslech matice $(\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C})$. Z důvodu stability pozorovatele pro diskretní systém musí jeho póly ležet uvnitř jednotkové kružnice a kvůli rychlosti musí póly ležet blíž k nule, než póly systému. Po vhodné volbě pólů pozorovatele je již možné určit matici $\mathbf{L}$.

7.2. Kalmanův filtr

Kalmanův filtr, stejně jako Luenbergerův pozorovatel, umožňuje ze znalosti výstupů soustavy rekonstruovat stavové proměnné, které mohou být následně použity pro MPC regulátor. Poprvé byl popsán v roce 1960 v [24] a od té doby byl mnohokrát vylepšen a upraven pro různé účely (sledování a predikce pohybu, navigace, regulace a další).

Podle [25] je Kalmanův filtr optimální rekurzivní algoritmus pro filtraci (zpracování) dat (optimal recursive data processing algorithm). V [26] je Kalmanův filtr popsán následovně:

Pro diskretní systém popsáný lineární diferenciální rovnicí

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_k + \mathbf{w}_{k-1}, \quad (7.18)$$

s měřenou veličinou

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k, \quad (7.19)$$

se Kalmanův filtr snaží odhadnout stavy $\mathbf{x}_k \in \mathbb{R}^n$. Veličiny $\mathbf{w}_k$ a $\mathbf{v}_k$ jsou šum procesu a šum měření. Předpokládá se, že to jsou na sobě nezávislé diskrétní bílé posloupnosti s normální rozložením pravděpodobnosti

$$p(\mathbf{w}) \sim N(0, \mathbf{Q}), \quad (7.20)$$

$$p(\mathbf{v}) \sim N(0, \mathbf{R}), \quad (7.21)$$

kde $\mathbf{Q}$ je kovarianční matice procesního šumu a $\mathbf{R}$ je kovarianční matice šumu měření. Tyto matice se mohou v čase měnit, avšak předpokládá se, že jsou konstantní.

Definujme $\hat{\mathbf{x}}_k^- \in \mathbb{R}^n$ jako apriorní odhad stavu v kroku k se znalostí procesu před krokem k a $\hat{\mathbf{x}}_k \in \mathbb{R}^n$ jako aposteriorní odhad stavu v kroku k vzhledem k měření $\mathbf{z}_k$. Dále můžeme definovat apriorní a aposteriorní odchylky odhadu jako

$$\mathbf{e}_k^- \equiv \mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k^-, \quad (7.22)$$

$$\mathbf{e}_k \equiv \mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k. \quad (7.23)$$

Apriorní kovarianční odchylka odhadu je potom

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{E} [\mathbf{e}_k^- \mathbf{e}_k^{-T}], \quad (7.24)$$

a aposteriorní kovarianční odchylka odhadu je

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{E} [\mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^T]. \quad (7.25)$$

Hledáme rovnici pro aposteriorní odhad stavů $\hat{\mathbf{x}}_k$ jako lineární kombinaci apriorních odhadů stavů $\hat{\mathbf{x}}_k^-$ a váženého rozdílu mezi měřenou veličinou $\mathbf{z}_k$ a predikcí měřené veličiny $\mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_k^-$

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K} (\mathbf{z}_k - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_k^-). \quad (7.26)$$

Rozdíl $(\mathbf{z}_k - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_k^-)$ se nazývá *inovace* nebo *zbytek*. Pokud je inovace (zbytek) nulová, měřená veličina a její odhad jsou shodné.

Matice $\mathbf{K}$ je zesílení, které minimalizuje aposteriorní kovarianční odchylku

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} = \frac{\mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T}{\mathbf{H} \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R}}. \quad (7.27)$$

Pokud se kovarianční matice šumu měření $\mathbf{R}$ blíží k nule, zesílení $\mathbf{K}$ má výraznější vliv na inovaci (zbytek)

$$\lim_{\mathbf{R}_k \rightarrow 0} \mathbf{K}_k = \mathbf{H}^{-1}. \quad (7.28)$$

Naopak pokud se apriorní kovarianční matice odchylek odhadu $\mathbf{P}_k^-$ blíží k nule, zesílení $\mathbf{K}$ má menší vliv na inovaci (zbytek)

$$\lim_{\mathbf{P}_k^- \rightarrow 0} \mathbf{K}_k = 0. \quad (7.29)$$

Zjednodušeně se dá říci, že pokud se matice $\mathbf{R}$ blíží k nule, filtr více „věří“ měřené hodnotě $\mathbf{z}_k$ a naopak méně „věří“ predikované hodnotě $\mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_k^-$. Naopak pokud se matice $\mathbf{P}_k^-$ blíží k nule, filtr více „věří“ $\mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_k^-$ a méně $\mathbf{z}_k$.

Rovnice Kalmanova filtru je možné rozdělit do dvou kroků, predikčního (time update) a korekčního (measurement update). Predikční rovnice zajišťují výpočet apriorního odhadu pro následující krok, korekční rovnice řeší zlepšení apriorního odhadu za pomoci měřené hodnoty na aposteriorní odhad.

Predikční rovnice můžeme zapsat ve tvaru

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_k, \quad (7.30)$$

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{A}\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q}, \quad (7.31)$$

a korekční rovnice ve tvaru

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H}\mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}, \quad (7.32)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_k^-), \quad (7.33)$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \mathbf{P}_k^-. \quad (7.34)$$

8. Návrh regulátorů

V této kapitole je popsán postup návrhu regulátorů. Podkladem byly modely popsané v kapitole 6.

8.1. Prediktivní regulátory - MPC

Pro návrh prediktivního (Model predictive control - MPC) regulátoru byl využit Multi-Parametric Toolbox (MPT) pro Matlab. Tento toolbox je určený pro návrh a analýzu optimálních regulátorů pro lineární, nelineární a hybridní systémy s omezeními. Regulátor navržený pomocí MPT může být buď explicitní, nebo online. Využíván je explicitní regulátor zejména proto, že při regulaci vyžaduje výrazně nižší výpočetní výkon.

Pro návrh MPC regulátorů nebylo možné použít model místnosti vytvořený v Simscape, protože po převedení tohoto modelu do stavového modelu obsahoval řádově stovky stavů (pro každou konstrukční vrstvu jeden). Na základě tohoto modelu nebylo možné MPC regulátory navrhnout, protože výpočetní náročnost převyšovala reálné možnosti. Při pokusu o zjednodušení (funkcí `balred`) tohoto modelu již stavy neodpovídaly skutečným, takže nebylo možné určit jejich omezení. Proto byl model zjednodušen analyticky (viz kapitola 6.2). Model byl před výpočtem regulátoru načten do objektu `sysStruct`, čímž byl i převeden do diskrétního času (pomocí funkce `c2d`). Pro každý z regulátorů byla zvolena jiná vzorkovací perioda (400 sekund pro otopné těleso a 200 sekund pro fancoil), protože časové konstanty jsou rozdílné a použitím delší vzorkovací periody se zlepšuje kvalita regulace.

MPT vyžaduje pro výpočet kromě modelu systému také omezení a penalizaci vstupů, výstupů a stavů. Omezení (constraints) byla určena dle reálných vlastností regulovaného systému. Vstupem systému je změna otevření ventilu a jeho omezení byla stanovena podle rozsahu ventilu (0 – 1 pro topení, 0 – 100 % pro chlazení) a podle vzorkovací periody. Výstupem je teplota v místnosti, která byla omezena na 15 až 30 °C. Ze stavů byly omezeny pouze míry otevření ventilů. Penalizace vstupů, výstupů a stavů byly nastavovány empiricky, ze stavů jsou penalizovány pouze stavy ventilů.

Pro výpočet regulátoru bylo nutné nastavit jeho parametry, například predikční horizont, stupeň optimality a kritérium (využívá se kvadratické).

Byly navrženy dva MPC regulátory - jeden pro regulaci otopného tělesa a druhý pro regulaci fancoilu.

Pro rekonstrukci (odhad stavů) bylo možné použít Luenbergerův stavový pozorovatel nebo Kalmanův filtr. Ukázalo se, že nastavení Kalmanova filtru je jednodušší a v tomto případě i fungoval lépe, proto byl zvolen tento způsob rekonstrukce stavů.

8.2. PI regulátory

MPC regulátory nebylo možné kvůli vysoké výpočetní náročnosti implementovat do kontroleru, který ovládá akční členy a snímá teplotu v řešené místnosti. Z důvodu robustnosti řídicího systému a kvůli odolnosti regulace vůči výpadku komunikace bylo nutné do kontroleru implementovat i lokální řízení. Byl zvolen PI regulátor, protože dokáže vyregulovat

poruchu a oproti PID regulátoru není náchylný na zbytečně velké akční zásahy při šumu měřené veličiny. Původní PI regulátor byl rozdělen na dva (pro regulaci otopného tělesa a fancoilu) z důvodu výrazně odlišných časových konstant těchto procesů. Oba regulátory byly navrženy metodou požadovaného rozložení pólů uzavřeného obvodu podle [27].

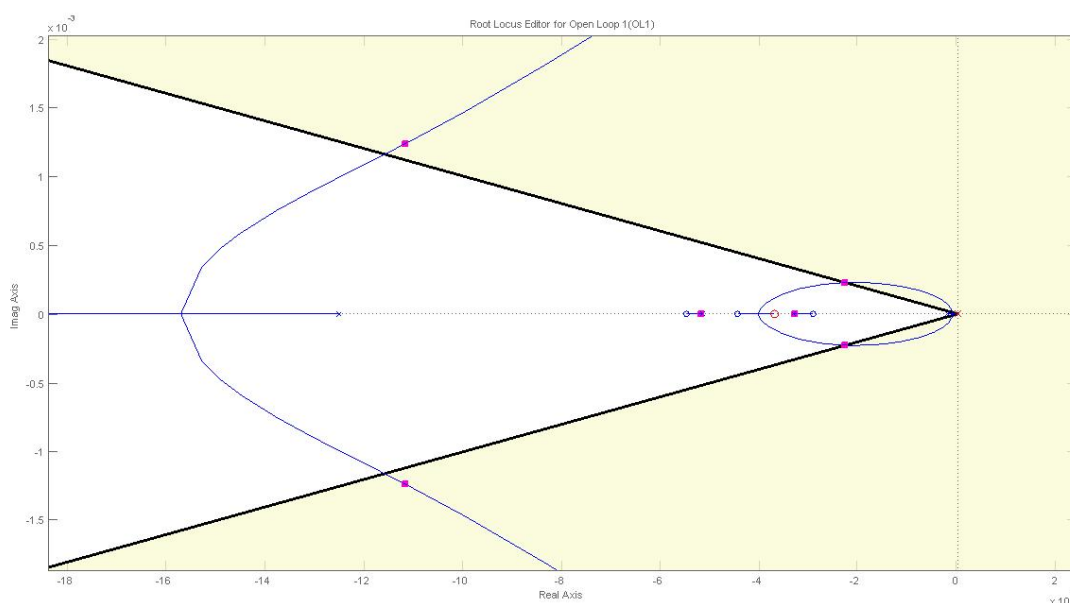
Regulátor pro otopné těleso

PI regulátor je možné zapsat ve tvaru

$$R_t = K_t \frac{1 + T_t p}{p}, \quad (8.1)$$

kde R_t je přenos regulátoru otopného tělesa, K_t je zesílení regulátoru otopného tělesa a T_t je časová konstanta regulátoru otopného tělesa.

Nula regulátoru byla umístěna do bodu $(-3,7037 \cdot 10^{-4}; 0)$ tak, aby byly co nejvíce kompenzovány dominantní póly soustavy. Následně bylo s využitím kořenového hodografu stanoveno zesílení regulátoru pro tlumení $\xi = 0,707$ (dominantní póly byly posunuty na přímky vymezující oblast pro toto tlumení v rovině p).



Obrázek 8.1: Kořenový hodograf soustavy a regulátoru otopného tělesa

Výsledný přenos regulátoru pro otopné těleso je

$$R_t = 0,0003 \frac{1 + 2700p}{p}. \quad (8.2)$$

Následně byl regulátor převeden na diskretní verzi. Vzorkovací perioda byla určena podle kontroléru, který regulátory vzorkuje jednou za sekundu

$$T_s = 1 \text{ s}, \quad (8.3)$$

$$k_t = K_t T_t, \quad (8.4)$$

$$ds_t = \frac{T_s}{T_t}, \quad (8.5)$$

$$R_{td} = k_t \left(1 + ds_f \frac{z^{-1}}{1 - z^{-1}} \right) = 0,0003 \left(1 + 2700 \frac{z^{-1}}{1 - z^{-1}} \right). \quad (8.6)$$

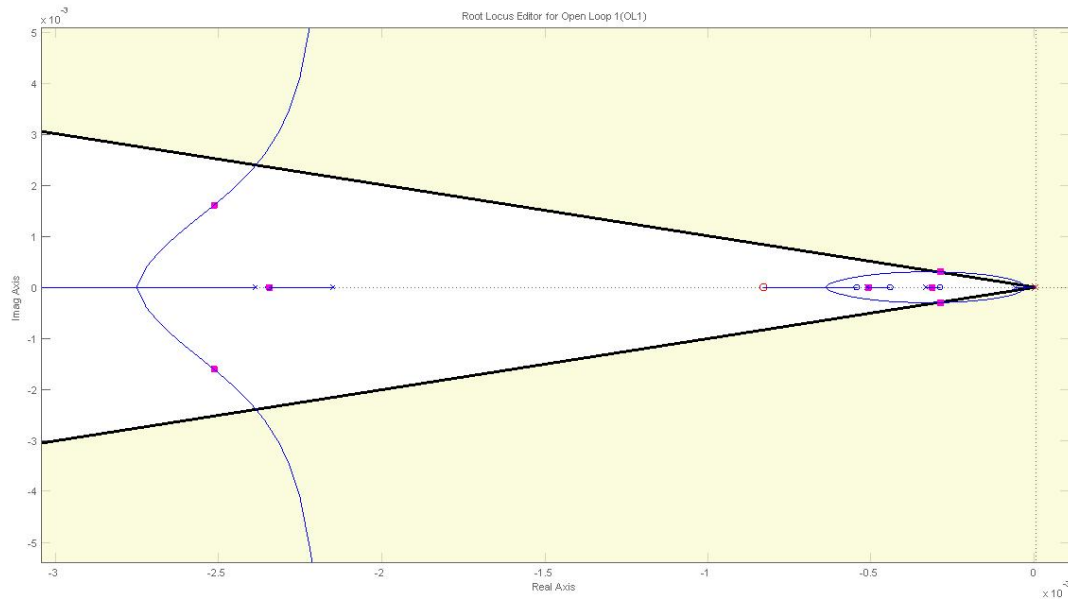
Regulátor pro fancoil

PI regulátor je možné zapsat ve tvaru

$$R_f = K_f \frac{1 + T_f p}{p}, \quad (8.7)$$

kde R_f je přenos regulátoru fancoilu, K_f je zesílení regulátoru fancoilu a T_t je časová konstanta regulátoru fancoilu.

Nula regulátoru byla umístěna do bodu $(-8,333 \cdot 10^{-4}; 0)$ tak, aby byly co nejvíce kompenzovány dominantní póly soustavy. Následně bylo s využitím kořenového hodografu stanoveno zesílení regulátoru pro tlumení $\xi = 0,707$ (dominantní póly byly posunuty na přímky vymezující oblast pro toto tlumení v rovině p).



Obrázek 8.2: Kořenový hodograf soustavy a regulátoru fancoilu

Výsledný přenos regulátoru pro fancoil je

$$R_f = 0,01 \frac{1 + 1200p}{p}. \quad (8.8)$$

Následně byl regulátor převeden na diskrétní verzi. Vzorkovací perioda byla určena podle kontroléru, který regulátory vzorkuje jednou za sekundu

$$T_s = 1 \text{ s}, \quad (8.9)$$

$$k_f = K_f T_f, \quad (8.10)$$

$$ds_f = \frac{T_s}{T_f}, \quad (8.11)$$

$$R_{fd} = k_f \left(1 + ds_f \frac{z^{-1}}{1 - z^{-1}} \right) = 0,01 \left(1 + 1\,200 \frac{z^{-1}}{1 - z^{-1}} \right). \quad (8.12)$$

8.3. Úpravy v kontroléru

Pro implementaci regulátorů bylo nutné upravit programové vybavení kontroléru DFC-304, který snímá vstupní veličiny a ovládá akční členy v místnosti. Úpravy popsané v této kapitole byly realizovány v laboratorních podmínkách (na stejném typu kontroléru včetně ovládacího panelu - viz kap. 3.2) a v době dokončování této práce se připravovalo nasazení v reálném provozu.

Původní software obsahoval pouze jednu žádanou hodnotu pro topení a chlazení (s pásmem necitlivosti) a pouze jeden regulátor pro topení i chlazení.

Žádaná hodnota byla rozdělena na žádanou hodnotu pro topení a žádanou hodnotu pro chlazení. Tato úprava je nutná dle [2]. Žádané hodnoty jsou nastavitelné uživatelem (pomocí ovládacího panelu DNS-24L) a také ze strany Správy budov (pomocí BMS MU). Žádanou hodnotu je možné měnit pouze v určitém rozsahu, pro topení byl stanoven rozsah 10 – 22 °C, pro chlazení 23,5 – 35 °C. Tím je zajištěno, že v místnosti se nebude současně topit a chladit. Zmíněné meze jsou také použity pro přepínání MPC regulátorů (pokud je aktuální hodnota teploty v rozsahu pro topení, regulátor pro chlazení není v provozu a naopak).

U původního regulátoru docházelo k automatické změně proporcionální složky podle režimu (topení, chlazení), integrační složka byla pro topení a chlazení shodná. Bylo zjištěno, že použití jednoho regulátoru není dostatečné pro zajištění vhodné kvality regulace.

Následně byla provedena příprava na integraci splitu s ostatními technologiemi HVAC v místnosti. V budoucnu instalovaný split má být využíván pro chlazení v zimním období (kdy je centrální zdroj chladu odstaven z provozu a tedy i fancoil je mimo provoz) a pro přídatné chlazení v ostatních ročních obdobích (kvůli značnému plánovanému navýšení tepelných zisků uvnitř místnosti z důvodu doplnění laboratorních přístrojů). Splitové jednotky mají vlastní regulaci teploty, takže je nutné pouze pomocí komunikačního rozhraní Modbus nastavit shodnou žádanou hodnotu teploty s žádanou hodnotou pro fancoil a stejným způsobem povolovat či zakazovat chod splitu. Povolení chodu splitu může nastat pouze v následujících případech:

- je zakázaný provoz fancoilu (v zimním období, kvůli poruše, servisu atd.) a zároveň je aktuální hodnota teploty v místnosti v rozmezí určeném pro chlazení (23,5 – 35 °C) či vyšší

- je povolen provoz fancoilu a jeho výkon není dostatečný pro dosažení žádané hodnoty (což lze odvodit od stavu ventilu fancoilu - pokud je delší dobu otevřen na 100 % nebo je možné na základě modelu určit přibližnou venkovní teplotu, při které lze očekávat nedostatečný výkon fancoilu)

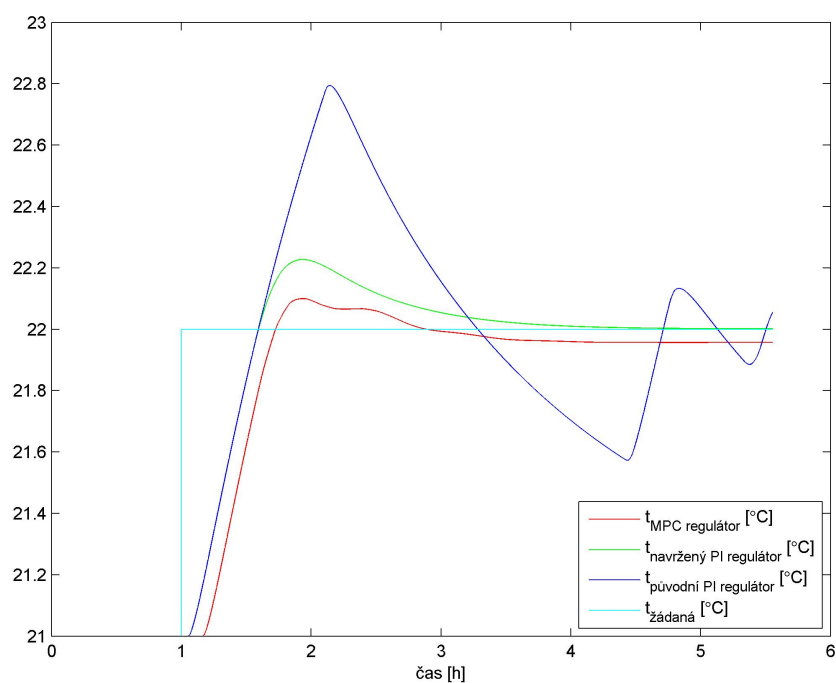
8.4. Porovnání navržených regulátorů

Porovnání regulátorů je provedeno na základě simulace v prostředí Matlab/Simulink, v době dokončování této práce probíhaly přípravy k ověření algoritmů regulace v reálném provozu.

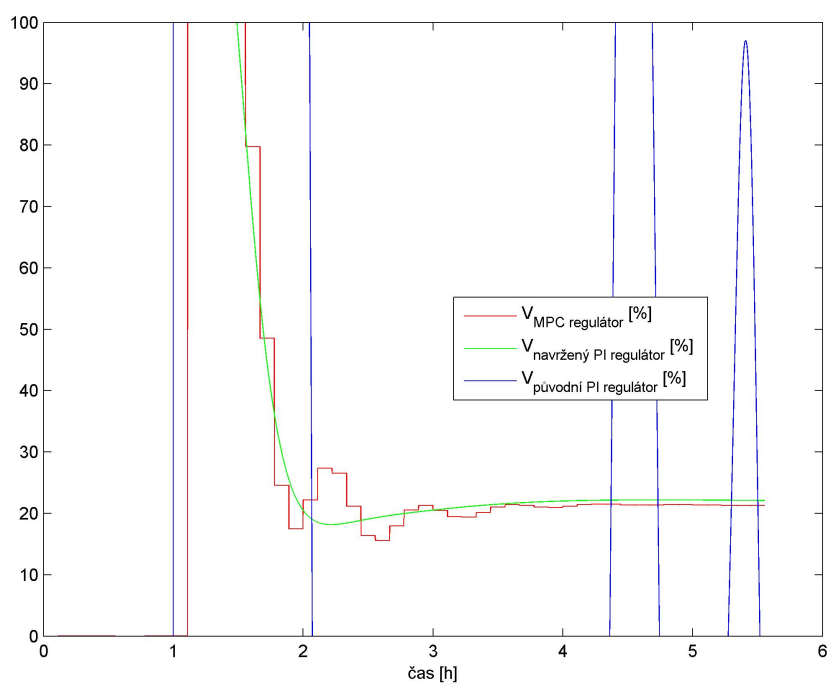
U regulátorů pro topení (viz obr. 8.3) se podařilo výrazně snížit překmit při skoku žádané hodnoty (původní PI regulátor má překmit cca 80 %, navržený PI regulátor cca 23 % a MPC regulátor cca 10 %) a u navržených regulátorů dojde k ustálení ve výrazně kratším čase. I přes zpožděnou reakci je pro regulaci topení nejvhodnější MPC regulátor (zpoždění o 400 sekund je způsobeno vzorkovací periodou). Vyregulování poruchy proběhne uspokojivě pro MPC a navržený PI regulátor, původní regulátor způsobí téměř netlumené kmitání systému (viz obr. 8.7). Při regulaci pomocí MPC regulátoru se vyskytuje malá ustálená regulační odchylka (cca 0,05 °C), která je způsobena nenulovou penalizací změn akční veličiny. Tato penalizace je nutná kvůli omezení kmitání akčních členů a teploty v místnosti. Ustálená odchylka je výrazně menší, než přesnost snímače teploty ($\pm 0,2$ °C).

U regulátorů pro fancoil je situace složitější (viz obr. 8.5). Původní PI regulátor je značně pomalý (žádané hodnoty dosáhne až po 80 minutách a k ustálení dojde po cca 4 hodinách), avšak má překmit pouze 8 %. Navržený PI regulátor má větší překmit (cca 15 %), avšak žádané hodnoty dosáhne již po 40 minutách a k ustálení dojde po 2 hodinách. MPC regulátor dosáhne žádané hodnoty po 20 minutách a překmit je cca 14 %. Vyregulování poruchy (viz obr. 8.9) je téměř srovnatelné pro navržený PI a MPC regulátor, původní regulátor dosahuje výrazně horších výsledků (vyreguluje poruchu za dvojnásobný čas). U MPC regulátoru pro fancoil se opět vyskytuje malá ustálená regulační odchylka (cca 0,05 °C), která má stejný důvod, jako u MPC regulátoru pro topení. U MPC regulátoru existují možnosti vylepšení, druhý překmit je způsoben mírnou odlišností modelu použitého pro MPC regulátor a reálného systému (modelu v Simscape). Je možné opět zhodnotit, že MPC regulátor je nejvhodnější.

8.4. POROVNÁNÍ NAVRŽENÝCH REGULÁTORŮ

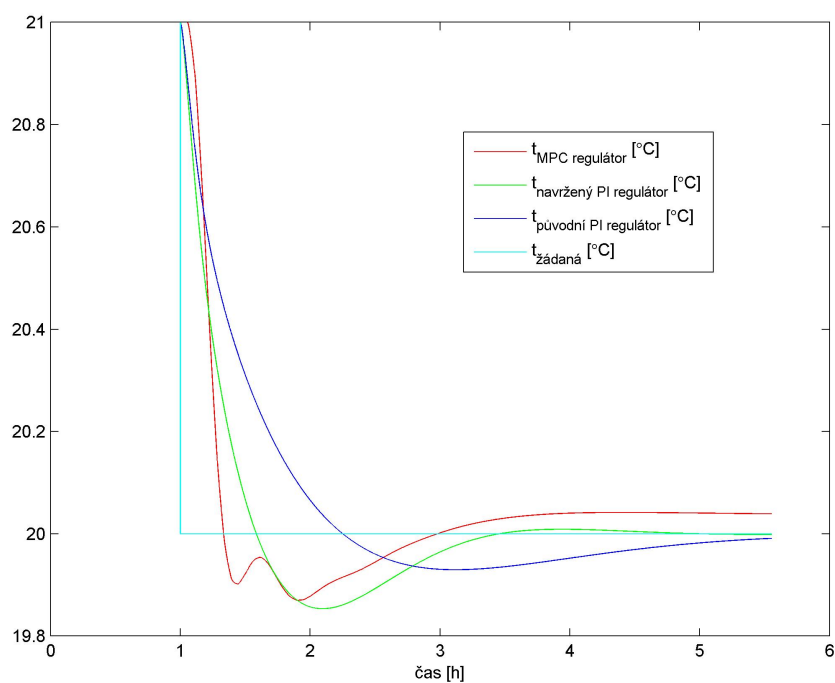


Obrázek 8.3: Odezva na jednotkový skok žádané hodnoty pro topení

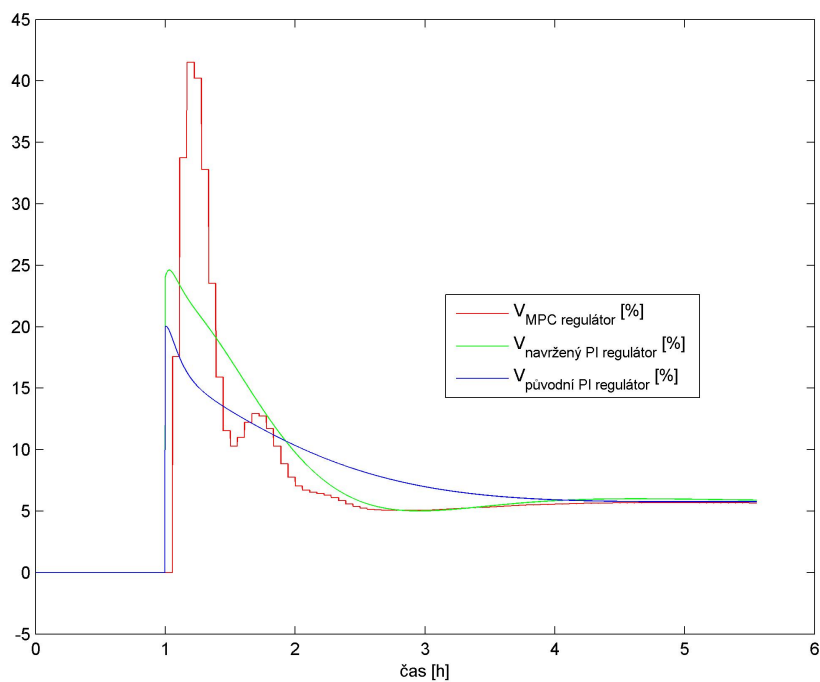


Obrázek 8.4: Akční zásahy u odezvy na jednotkový skok žádané hodnoty pro topení

8.4. POROVNÁNÍ NAVRŽENÝCH REGULÁTORŮ

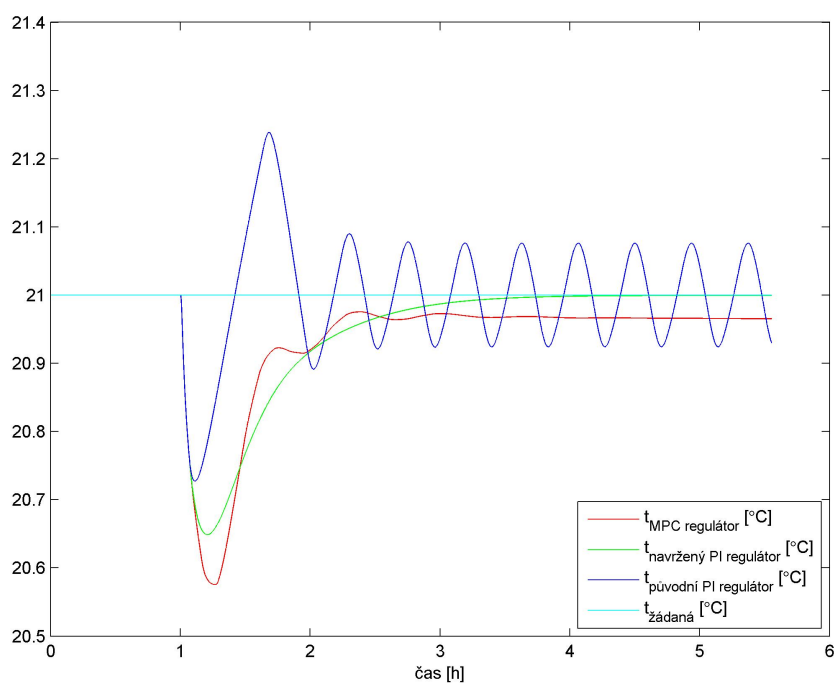


Obrázek 8.5: Odezva na jednotkový skok žádané hodnoty pro fancoil

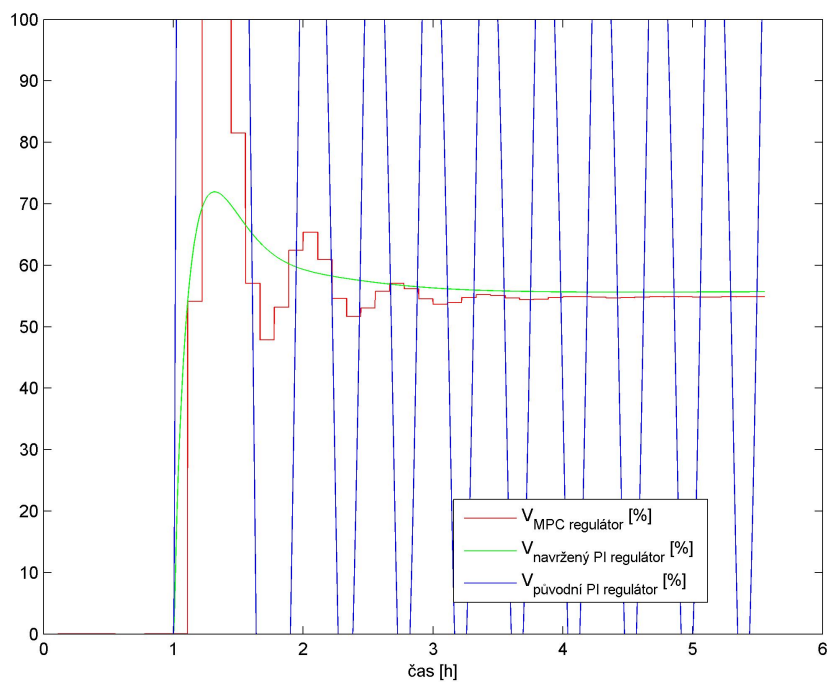


Obrázek 8.6: Akční zásahy u odezvy na jednotkový skok žádané hodnoty pro fancoil

8.4. POROVNÁNÍ NAVRŽENÝCH REGULÁTORŮ

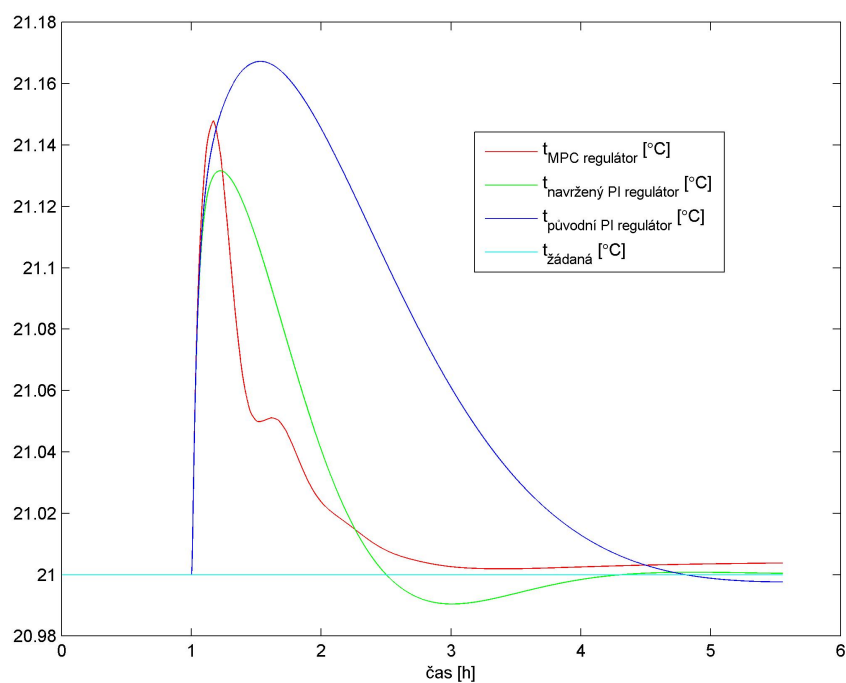


Obrázek 8.7: Odezva na skok poruchy pro topení - výrazný pokles venkovní teploty

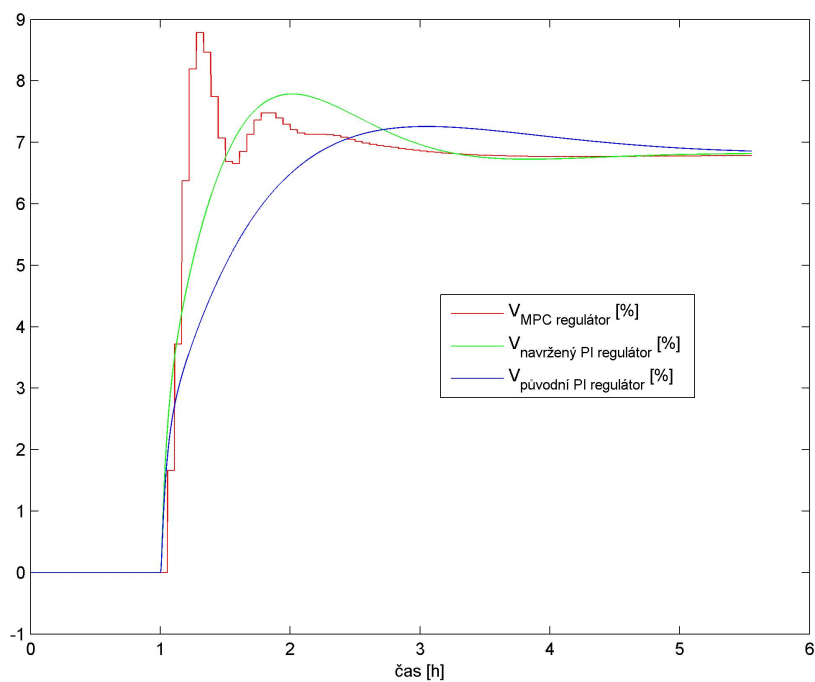


Obrázek 8.8: Akční zásahy u odezvy na skok poruchy pro topení pro topení - výrazný pokles venkovní teploty

8.4. POROVNÁNÍ NAVRŽENÝCH REGULÁTORŮ



Obrázek 8.9: Odezva na skok poruchy pro fancoil - výrazné zvýšení venkovní teploty



Obrázek 8.10: Akční zásahy u odezvy na skok poruchy pro fancoil - výrazné zvýšení venkovní teploty

9. Závěr

V rámci této práce byl navržen tepelný model pro místnost číslo 309 pavilonu A7 včetně zdrojů tepla a chladu a následně byly na základě tohoto modelu navrženy MPC a PI regulátory.

Při vytváření modelu bylo využito prostředí Matlab/Simulink s rozšířením Simscape. Model místnosti, tedy stěny, strop, okna, dveře a podlaha, byl vytvořen na základě reálné skladby a rozměrů těchto konstrukcí či prvků. Podle skutečnosti byly také modelovány objemy vzduchu v místnostech (nejenom v místnosti 309, ale i v přilehlých místnostech).

Následně byl model místnosti doplněn o zdroje tepla a chladu, konkrétně fancoil, otopná tělesa, vzduchotechniku, venkovní teplotu a vliv zařízení a osob v místnosti. Výkony fancoilu a otopných těles byly zjištěny v katalogových listech těchto zařízení a následně použity v modelu. Vliv vzduchotechniky na teplotu v místnosti je modelován na základě množství přiváděného a odtahovaného vzduchu dle projektové dokumentace. Vliv zařízení a osob v místnosti byl zjišťován empiricky, bohužel jej není možné měřit. Avšak průběh tohoto vlivu je do jisté míry pravidelný a popsatelný (např. v neděli je obvykle vliv velmi malý, v sobotu působí na teplotu v místnosti pouze dopoledne, ve všední dny obvykle v pracovní době). Dále bylo zjištěno, že v přechodných obdobích (podzim, jaro - teploty v rozmezí 5 – 15 °C) má vliv zařízení a osob za důsledek nutnost chlazení místnosti fancoilem, aby bylo dosaženo žádané hodnoty teploty.

Průběhy modelované a měřené teploty v místnosti byly vůči sobě porovnány pro značné množství časových intervalů o délce jeden den. Bylo zjištěno, že mezi těmito průběhy nejsou výrazné rozdíly a model tedy odpovídá realitě. V modelu jsou zahrnuty všechny významné zdroje tepla a chladu, které ovlivňují teplotu v místnosti.

Data pro porovnání modelu se skutečnými průběhy byla získána z databáze Historian. Ta slouží jako archivační nástroj provozních dat pro BMS MU a pomocí protokolu BACnet ukládá historická data ze všech technologií a zařízení (různých výrobců), komunikujících tímto protokolem. Tedy i přes odlišnost použitých technologií (fancoil, otopné těleso, ústřední topení, vzduchotechnika) je možné k těmto datům přistupovat shodným způsobem. Navíc toto řešení umožňuje vcelku jednoduše model upravit pro jakoukoliv jinou místnost (i třeba v jiné budově), nezávisle na výrobcích jednotlivých zařízení a technologií. Nutnými podmínkami jsou aktuální data v pasportech MU, existence projektové dokumentace a připojení zmíněných technologií do BMS MU standardním protokolem BACnet.

Celý systém (místnost a zdroje tepla/chladu) je pro účely modelování brán jako spojitý i přes to, že vstupní data jsou vzorkována. Toto zjednodušení je možné díky tomu, že časové konstanty teploty v místnosti mají velikost řádově tisíce sekund, oproti tomu vzorkovací perioda teploty v místnosti je 300 sekund (5 minut). Tím je s dostatečnou rezervou dodržen vzorkovací teorém a popsané zjednodušení je možné použít.

Model vytvořený v Simscape musel být pro návrh MPC regulátorů výrazně zjednodušen a mírně upraven, postup je podrobně popsán v kapitole 6.2. Na základě tohoto modelu byly pomocí MPT (Multi-Parametric Toolbox) navrženy dva MPC regulátory (jeden pro chlazení a druhý pro topení). Kvůli odolnosti vůči výpadkům komunikace byly navrženy i PI regulátory, které je možné implementovat přímo v kontroléru DFC-304 (MPC re-

gulátory musí být kvůli výpočetní náročnosti realizovány na serverovém počítači, který komunikuje s kontrolérem), tím je zajištěna robustnost algoritmů pro regulaci teploty.

Pro MPC regulátor je nutné zajišťovat aktuální hodnoty stavů systému, avšak měřitelná je pouze teplota v místnosti. K rekonstrukci (odhadu) stavů byl použit Kalmanův filtr, který na základě znalosti modelu a jeho vstupů a výstupů vypočítá hodnoty stavů systému.

Zhodnocení regulátorů je podrobně popsáno v kapitole 8.4, porovnání bylo provedeno na základě simulací v prostředí Matlab/Simulink. Obecně se dá říci, že MPC regulátor dosahuje při regulaci nejlepších výsledků v porovnání s původními i nově navrženými PI regulátory. Rozdíl je výrazný zejména při regulaci otopného tělesa, kdy MPC regulátor dokáže regulovat s výrazně menším překmitem při skoku žádané hodnoty. Avšak pro návrh a korektní fungování MPC regulátoru je nutné sestavit model regulované soustavy a zajistit, aby model systému co nejvíce odpovídal realitě, při odlišnosti modelu může regulace vykazovat problémy. Tyto skutečnosti činí návrh MPC regulátoru složitějším oproti PI regulátorům, což může být vyváжено lepšími výsledky při regulaci. Další výhodou MPC regulátoru je možnost omezení akčního zásahu (případně i stavů a výstupů), takže není nutné řešit *wind-up* jev (jako u PI či PID regulátorů). Také lze očekávat, že použitím MPC regulátorů je možné ušetřit značnou část energií na vytápění a chlazení a tím snížit provozní náklady (podle [28] je možné kombinací MPC regulátoru a předpovědi počasí ušetřit cca 17 – 24 % energií na vytápění).

V rámci této práce byly také přepracovány řídicí algoritmy v kontroléru DFC-304, který snímá teplotu v místnosti a ovládá akční členy. Po praktickém ověření algoritmů lze očekávat jejich plošné nasazení v Univerzitním kampusu Bohunice (jedná se o cca 250 místností), protože nově navržené algoritmy podle předběžných výsledků zlepšují kvalitu regulace, poskytují větší komfort při ovládání ze systému BMS MU a jsou připraveny k možným rozšířením a úpravám (např. integrace dalších technologií). V souvislosti s probíhajícím rozšiřováním Univerzitního kampusu Bohunice byl ze strany dodavatele (Synerga a. s.) projeven zájem o tyto algoritmy a jejich možné nasazení pro individuální regulaci teplot v místnostech nově postavených budov.

Literatura

- [1] VRÁNA, Jakub. *Technická zařízení budov v praxi*. Praha: Grada, první vydání, 2007. ISBN 978-80-247-1588-9. 331 s.
- [2] *Nařízení vlády č. 93/2012 Sb., kterým se mění nařízení vlády č. 361/2007 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci, ve znění nařízení vlády č. 68/2010 Sb.* Sbírka zákonů, 2012 [cit. 2013-04-04].
Dostupné z: <<http://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/ViewFile.aspx?type=z&id=24089>>
- [3] KARJALAINEN, Sami, KOISTINEN, Olavi. *User problems with individual temperature control in offices. Building and Environment*, ročník 42, č. 8, 2007 [cit. 2013-02-20]: s. 2880 – 2887. ISSN 0360-1323. doi:10.1016/j.buildenv.2006.10.031.
Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132306003349>>
- [4] Wikipedia. *Ekvitermní regulace*. [Online], 2001-2013 [cit. 2013-02-18].
Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Ekvitermní_regulace>
- [5] KROUTIL, Petr, VYTRHLÍK, Martin. *Stavební pasport MU, import a export grafických dat a automatické generování kót. Zpravodaj ÚVT MU Bulletin pro zájemce o výpočetní techniku na Masarykově univerzitě*, ročník 21, č. 2, 2010 [cit. 2012-10-15].
Dostupné z: <<http://www.ics.muni.cz/bulletin/articles/658.html>>
- [6] AHI Carrier. *Heating And Air Conditioning - Carrier*. [Online], 2012 [cit. 2012-10-15].
Dostupné z: <<http://www.ahi-carrier.com.au/product.cfm?productid=87&content=53>>
- [7] Gienger spol. s r.o. *COSMO*. [Online], 2010 [cit. 2012-11-22].
Dostupné z: <http://www.gcskupina.cz/upload/files/nase-vyrobky/TOPENI/Plosna_otopna_telesa/Cosmo/cosmo_techicka_data.pdf>
- [8] Ústav výpočetní techniky MU, GiTy. *Metodika nasazování a úprav komponent BMS MU*, 2011.
- [9] Delta Controls. *BACnet International*. [Online], 2010 [cit. 2012-11-22].
Dostupné z: <<http://www.bacnetinternational.net/catalog/index.php?m=14&p=97>>
- [10] Masarykova univerzita, GiTy. *BMS MU*. [Online], 2007 [cit. 2012-10-12].
Dostupné z: <bms.ics.muni.cz>
- [11] Delta Controls. *DFC-304R3-240 Fan Coil Controller*. [Online], 2012.
Dostupné z: <<http://www.deltacontrols.com/solutions-products/products/hvac/application-controllers/dfc-304-r3>>

- [12] Delta Controls. *BACstat II DNS-24L\H24LB*. [Online], 2012 [cit. 2012-11-22].
Dostupné z: <<http://www.deltacontrols.com/solutions-products/products/hvac/sensors-thermostats/dns-24l>>
- [13] GOSSE, Jonathan F. (editor). *Building automation: system integration with open protocols*. Orland Park: American Technical Publishers, 2009. ISBN 978-082-6920-126, 338 s.
- [14] MERZ, Hermann, HANSEMAN, Thomas, HÜBNER, Christof. *Automatizované systémy budov: sdělovací systémy KNX/EIB, LON a BACnet*. Praha: Grada, první vydání, 2008, 261 s.
- [15] HALLIDAY, David, RESNICK, Robert, WALKER, Jearl. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: Prometheus, první vydání, 2006. ISBN 80-214-1868-0, 1254 s.
- [16] BEJČEK, Ludvík, ČEJKA, Miloslav, REZ, Jiří, aj. *Měření v elektrotechnice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003.
- [17] MathWorks. *Simscape: User's Guide*. Natick: MathWorks, r2012b vydání, 2012 [cit. 2012-11-22].
Dostupné z: <http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/physmod/simscape/simscape_ug.pdf>
- [18] Microsoft. *timestamp (Transact-SQL)*. [Online], 2005 [cit. 2012-11-12].
Dostupné z: <[http://msdn.microsoft.com/en-us/library/ms182776\(v=sql.90\).aspx](http://msdn.microsoft.com/en-us/library/ms182776(v=sql.90).aspx)>
- [19] TZB-info. *Katalog stavebních materiálů*. [Online], 2013 [cit. 2012-11-15].
Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/docu/tabulky/0000/000086_katalog.html>
- [20] VAŠAK, M., STARČIĆ, A., MARTINČEVIĆ, A. *Model predictive control of heating and cooling in a family house*. In *MIPRO, 2011 Proceedings of the 34th International Convention*. May, s. 739–743.
- [21] KVASNICA, M., GRIEDER, P., BAOTIĆ, M., aj. *Multi-Parametric Toolbox (MPT)*. 2006 [cit. 2013-03-17].
Dostupné z: <<http://control.ee.ethz.ch/~mpt/downloads/MPTmanual.pdf>>
- [22] LUENBERGER, D.G. *Observers for multivariable systems*. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, ročník 11, č. 2, 1966: s. 190–197. ISSN 0018-9286. doi:10.1109/TAC.1966.1098323.
- [23] LUENBERGER, D.G. *An introduction to observers*. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, ročník 16, č. 6, 1971: s. 596–602. ISSN 0018-9286. doi:10.1109/TAC.1971.1099826.

- [24] KALMAN, Rudolph Emil. *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*. *Transactions of the ASME–Journal of Basic Engineering*, ročník 82, č. Series D, 1960: s. 35–45.
- [25] MAYBECK, Peter S. *Stochastic models, estimation, and control*, *Mathematics in Science and Engineering*, ročník 141. New York: Academic Press, 1979.
- [26] WELCH, Greg, BISHOP, Gary. *An Introduction to the Kalman Filter*. *SIGGRAPH*, , č. 8, 2001 [cit. 2013-04-15]: s. 19–29.
Dostupné z: <http://www.cs.unc.edu/~tracker/media/pdf/SIGGRAPH2001_CoursePack_08.pdf>
- [27] BLAHA, Petr, VAVŘÍN, Petr. *Řízení a regulace I*, 2009.
- [28] Prívara, Samuel, Šíroký, Jan, Ferkl, Lukáš, aj. *Model predictive control of a building heating system: The first experience*. *Energy and Buildings*, ročník 43, č. 2–3, 2011: s. 564 – 572. ISSN 0378-7788. doi:10.1016/j.enbuild.2010.10.022.
Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778810003749>>

Seznam použitých symbolů a zkratek

B	materiálová konstanta u polovodičových snímačů teploty
C	tepelná kapacita
c	měrná tepelná kapacita
d	tloušťka
H	tepelný tok
k	tepelná vodivost
λ	součinitel tepelné vodivosti
m	hmotnost
P	výkon
Q	teplo
R	odpor (elektrický, tepelný)
S	plocha (průřez)
T	termodynamická teplota
t	čas
u	vstupní veličina
x	stavová veličina
y	výstupní veličina
σ	Stefanova-Boltzmannova konstanta
ε	emisivita
B-AAC	BACnet Advanced Application Controller
BMS	Building Management System
BTL	BACnet Testing Laboratories
CCTV	Closed Camera Television - kamerový systém
EKV	Elektronická kontrola vstupu
EPS	Elektrická požární signalizace
EZS	Elektrická zabezpečovací signalizace

HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
HW	Hardware
IRC	Individual Room Control
IS MU	Informační systém Masarykovy univerzity
IS BAPS	Informační systém Brněnské akademické počítačové sítě
MaR	Měření a regulace
MPC	Model Predictive Control
MU	Masarykova univerzita
PICS	Protocol Implementation Conformance Statement
PWM	Puls Width Modulation - Pulzně šířková modulace
SW	Software
UKB	Univerzitní kampus Bohunice
ÚT	Ústřední topení
VZT	Vzduchotechnika

Seznam příloh

1. Tabulky vlastností konstrukčních prvků
2. Zdrojový kód SQL dotazu pro získání dat z databáze Historian
3. Zdrojové kódy úprav v kontroléru
4. Porovnání průběhů modelovaných a měřených veličin
5. Elektronická verze Bakalářské práce
6. Tepelný model místnosti v programu Matlab
7. Model regulace (MPC a PI regulátory, Kalmanův filtr) a algoritmy návrhu regulátorů