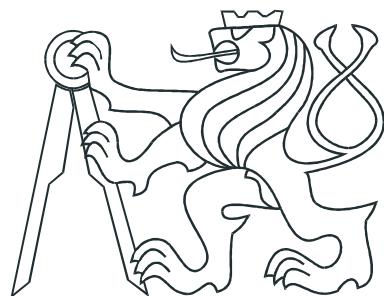


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Porovnání regulací vytápění budov

Praha, 2012

Autor: Ján Michalko

Prohlášení

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

V Praze dne

podpis

Pod'akovanie

Ďakujem predovšetkým vedúcemu svojej diplomovej práce Ing. Lukášovi Ferklovi, Ph.D. za vedenie a veľmi ústretový prístup pri konzultáciách.

Za informácie o simulačných programoch d'akujem prof. Ing. Karlovi Kabelemu, CSc. a Ing. Filipovi Jordánovi.

Za informácie o tepelnej ochrane budov d'akujem prof.Ing. Janovi Tywoniakovi, CSc. a za možnosť nahliadnuť do historických noriem tepelnej ochrany budov d'akujem pani doc.Ing. Šárke Šilarovej, CSc. a Ing. Davidovi Kolouchovi.

Za vytvorenie podmienok na štúdium, a podporu d'akujem svojim rodičom.

V neposlednom rade chcem pod'akovať svojej priateľke, Natálii Červenkovej za morálnu podporu, pomoc pri získavaní informácií na fakulte stavebnej a konzultácie hlavne stavebného charakteru, ktoré boli pri vytváraní modelu veľmi nápomocné.

Anotácia

Táto práca sa zaoberá porovnaním aplikácie rôznych regulačných metód na riadenie vykurovania rodinných domov. Popisuje podrobne vlastnosti simulačného modelu domu, ktorý je navrhnutý podľa skutočnej budovy. Ukazuje spôsob akým je modelovaná vykurovacia sústava. Následne sa pre dve stratégie vykurovania (konštantnú a útlmovú) porovnáva úroveň tepelného komfortu a spotrebu energie za vykurovaciu sezónu. Pre každú zo stratégií je vykonaná simulácia tromi regulačnými metódami: ekvitermou, PID a MPC regulátorom. Nakoniec je vykonaný rozbor výsledkov simulácií a zváženie vhodnosti využitia jednotlivých regulátorov pre danú vykurovaciu stratégiu.

Anotation

This thesis disserts upon compairing of application of various control methods for heating family houses. It describes in detail attributes of the simulation model of the house, which is designed according to a real building. It shows the way how the heating system was modeled. Then it compares level of thermal comfort and energy consumption during heating season for two heating strategies (constant temperature and decreasing temperature during the night). For both strategies there are performed simulations using three control methods: weather-compensation curve, PID and MPC controller. Finally there is performed analysis of simulation results and suitability of each controller for heating strategies is taken into consideration.

vložiť originálne zadanie !!!!!

Obsah

1	Úvod	1
2	Teoretické východiská	3
2.1	Základné fyzikálne princípy	3
2.1.1	Vedenie	4
2.1.2	Prúdenie	6
2.1.3	Žiarenie	7
2.1.4	Tepelný tok v stenách	9
2.1.5	Tepelná ochrana budov	11
2.2	Modelovacie prostredia	11
2.2.1	Trnsys všeobecne	12
2.2.2	Type 56	12
2.2.3	Úroveň detailnosti použitého simulačného modelu	14
2.3	Regulácia	15
2.3.1	Ekviterma	15
2.3.2	PID	16
2.3.3	MPC	16
2.4	Norma pre tepelný komfort	18
3	Implementácia	19
3.1	Popis simulačného modelu	19
3.1.1	Obálka budovy	19
3.1.2	Vykurovanie	22
3.1.3	Počasie a okrajové podmienky	24
3.2	Regulátory	24
3.2.1	Ekviterma	24
3.2.2	PID	25

3.2.3	MPC	26
3.2.3.1	Návrh modelu	27
3.2.3.2	Validácia	29
4	Výsledky	32
4.1	Konštantný režim	32
4.1.1	Zhodnotenie	32
4.1.1.1	Ekviterma	35
4.1.1.2	PID	36
4.1.1.3	MPC	37
4.1.2	Vyhodnotenie tepelného komfortu	38
4.1.3	Spotreba	40
4.2	Režim s útlmom	40
4.2.1	Zhodnotenie	40
4.2.1.1	Ekviterma	42
4.2.1.2	PID	43
4.2.1.3	MPC	44
4.2.2	Vyhodnotenie tepelného komfortu	45
4.2.3	Spotreba	47
5	Záver	48
Literatúra		50
A	Pôdorysy predlohy modelu	I
B	Obsah priloženého DVD	V

Kapitola 1

Úvod

Tak ako v minulosti, aj v súčasnej dobe je bývanie vo „vlastnom“ veľmi oblúbené. Domový a bytový fond Českej republiky v roku 2001 predstavoval 4 milióny bytov z čoho bolo 40.9% bytov v rodinných domoch. Momentálnym trendom je stavanie rodinných domov, ktoré majú väčšie relatívne rozmery na jedného obyvateľa. S tým sa spája aj vysoká spotreba energie potrebnej na vykurovanie. Tá je síce kompenzovaná použitím moderných izolačných materiálov, ale napriek tomu v súčasnej dobe energia spotrebovaná domácnosťou na vykurovanie predstavuje približne 70% jej celkovej spotreby. Väčšina kotlov určených pre využitie v rodinných domoch sa dnes dodáva s klasickou ekvitermnou reguláciou. Tá je takmer vždy prednastavená a užívateľ si upravuje iba sklon ekviternej krivky. V súčasnej dobe už nie je problém vybaviť regulátor dostatočným výpočtovým výkonom tak, aby bolo možné využiť i sofistikovanejšie regulačné metódy. Musíme však zobrať v úvahu, že takéto riešenie bude pravdepodobne finančne náročnejšie. Naskytajú sa nám teda otázky. Kolko finančných prostriedkov by sme mohli vďaka týmto metódam ušetriť? Zabezpečia nám vyšší tepelný komfort prostredia? Odpovede na tieto otázky sa pokúsim nájsť v tejto práci.

Najprv som si zostavil podrobný model budovy, na ktorom budem jednotlivé regulátory testovať. Budova je rozmernejšia ako bežný rodinný dom, ale tri poschodia majú každé samo o sebe aj pridanú výpovednú hodnotu. Napríklad tepelné chovanie najvyššieho poschodia je možné porovnať so stavbami, ktoré majú dobrú izoláciu, no nízku tepelnú kapacitu. Tieto vlastnosti majú, v tejto dobe čoraz populárnejšie, drevestavby. Kedže ich steny skladbou blízko pripomínajú skladbu drevenej strechy. Druhé poschodie zhora i zdola susedí s miestnosťami s rovnakou teplotou, ak sa naň pozrieme ako na samostatný blok, môžeme si ho predstaviť ako byt v bytovom dome. Prvé poschodie je najbežnejším príkladom, takmer každý rodinný dom má takéto prízemie či už na

pôde, alebo nad nevykurovaným suterénom.

Pre daný model som následne navrhol tri typy regulátorov, ktoré som otestoval na budove pre dve rôzne referencie. Konštantnú, ktorá v praxi nie je až tak obvyklá a referenciu s útlmom. Druhá možnosť je používaná vo väčšine domácností. Pre obe varianty som otestoval dve referenčné miestnosti.

Táto práca je členená nasledujúcim spôsobom. Druhá kapitola obsahuje stručný fyzikálny popis jednotlivých mechanizmov vedenia tepla a oboznamuje nás so základnou terminológiou. Nasleduje časť venovaná simulačnému prostrediu, ktoré som si na spracovanie tejto práce zvolil. Ďalej v nej popisujem základné princípy jednotlivých regulačných metód a uvádzam stručný výťah z českých noriem, ktoré majú úzku súvislosť s týmto problémom. Tretia kapitola obsahuje informácie o implementácii simulačného modelu a postupe návrhu jednotlivých regulátorov. Štvrtá kapitola je venovaná prezentácii výsledkov simulácií.

Kapitola 2

Teoretické východiská

2.1 Základné fyzikálne princípy

V tejto sekcií budem čerpať prevažne z titulu (FICKER, T., 2004).

Prenos tepla v budovách môže byť spôsobený jedným z troch mechanizmov, respektíve ich kombináciami.

- **Vedenie (Conduction).** O tomto mechanizme hovoríme predovšetkým u pevných látok. Častice majú svoju rovnovážnu polohu, okolo ktorej kmitajú. Energia oscilácií, alebo kinetická energia častíc je závislá na teplote. Častica s vyššou energiou naráža do svojho suseda s nižšou energiou a odovzdáva mu pri zrážke časť svojej energie. Tento proces nazývame vedenie tepla.

Aby sme mohli uvažovať o vedení tepla v tekutinách, musí sa jednať o makroskopicky nehybné prostredie. Príkladom môžu byť veľmi úzke medzery, malé dutiny alebo vrstva tesne priliehajúca na stene. U tekutín už častice nemajú pevnú rovnovážnu polohu. Tá sa im postupne mení (kvapaliny), alebo sa pohybujú voľne (plyny), ale stále v nich dochádza k odovzdávaniu energie pri zrážkach.

- **Žiarenie (Radiation).** Každá hmota, pokiaľ sa jej teplota nerovná absolútnej nule vyžaruje elektromagnetické žiarenie, ktorého intenzita je na teplote závislá. Toto žiarenie nepotrebuje pre prenos energie žiadnu hmotu a prechádza aj cez vákuum. Tento prenos uvažujeme hlavne medzi pevnými telesami.
- **Prúdenie (Convection).** Jedná sa o prenos energie v tekutinách, kedy sa zmiešavajú tekutiny s rôznou teplotou. Zmiešavanie je buď spôsobené prirodzene. Kedže každá tekutina má hustotu závislú na teplote, vzniká rozdiel tlakov, ktorý rozphořuje

tekutinu. Druhou možnosťou je, že pohyb tekutiny umelo vyvolávame. Napríklad u vzduchotechniky toto vykonáva ventilátor.

2.1.1 Vedenie

Prenos tepla médiom na základe experimentov popísal Joseph Fourier v „prvom Fouriérovom zákone vedenia tepla“.

$$Q = \lambda A \frac{(\Theta_1 - \Theta_2)t}{\Delta x} \quad (2.1)$$

Teplo Q prenesené cez médium, ktoré je medzi dvomi rovnobežnými plochami s plochou A je priamo úmerné tepelnému rozdielu plôch ($\Theta_1 - \Theta_2$), času t a súčiniteľom teplotnej vodivosti λ a nepriamo úmerné vzdialenosťi medzi plochami Δx .

Súčiniteľ tepelnej vodivosti je vlastnosťou každého materiálu a je závislý na zložení materiálu, nie na jeho geometrickom usporiadaní. Na základe tejto konštanty môžeme rozdeliť materiály na dobré vodiče (kovy) a vodiče zlé. Medzi najhoršie vodiče a teda dobré izolanty patria plyny. Aby v nich nezačalo dochádzať ku prenosu tepla prúdením, uzatvárajú sa do miniatúrnych komôrok v inom materiáli. Najlepším izolantom je vákuum, jeho problémom je však neexistencia technológie, ktorá by ho dokázala trvalo udržať. Tepelná vodivosť je závislá na vlhkosti a teplote. V stavebnictve sa zväčša závislosť na teplote zanedbáva, keďže teplota stien sa počas roka výrazne nemení. Závislosť na vlhkosti sa dá vyjadriť pomocou koeficientov lineárnej, kvadratickej a kubickej závislosti, v (ČSN 73 0540-3, 2005) je definovaný súčiniteľ tepelnej vodivosti ako

$$\lambda_u = \lambda_k [1 + z_1 \cdot Z_u \cdot (z_2 + z_3)], \quad (2.2)$$

prípadne

$$\lambda_u = \lambda_k [1 + z_1 \cdot Z_u \cdot z_{23}] \quad (2.3)$$

v závislosti na podmienkach. Jednotlivé parametre sú tabuľkovými hodnotami obsiahnutými v norme.

Tepelný tok ϕ je definovaný ako teplo prenesené látkou za jednotku času.

$$\phi = \frac{Q}{t} = \lambda A \frac{\Delta \Theta}{\Delta x} \quad (2.4)$$

Hustota tepelného toku q predstavuje teplo prenesené materiálom za jednotku času na jednotku plochy.

$$q = \frac{\phi}{A} = \frac{Q}{tA} = \lambda \frac{\Delta \Theta}{\Delta x} \quad (2.5)$$

Prvý Fourierov zákon zapísaný v diferenciálne forme znamená, že hustota tepelného toku je priamo úmerná tepelnej vodivosti a má opačný smer ako gradient teploty.

$$\mathbf{q} = -\lambda \nabla \Theta(x, y, z), \quad (2.6)$$

Rozdelenie teplôt v látke popisuje druhý Fourierov zákon, ktorý využíva poznatky z (2.6).

$$\rho c \frac{\partial \Theta}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla \Theta) + q^* \quad (2.7)$$

Vystupujú v ňom priestorové i časové premenné a to teplota $\Theta(x, y, z, t)$ a hustota tepelného toku $q^*(x, y, z, t)$ dodávaná vnútornými tepelnými zdrojmi. Zostávajúce premenné predstavujú hustotu látky ρ a mernú tepelnú kapacitu materiálu c . Z praktických dôvodov $\lambda(x, y, z, t)$ nahradíme konštantou λ a rovnica sa nám zjednoduší.

$$\frac{\Theta}{t} = a \nabla^2 \Theta + \frac{q^*}{\rho c} \quad (2.8)$$

Konštanty materiálu zlúčime do jednej a dostávame difuzivitu materiálu $a = \frac{\lambda}{\rho c}$.

Rovnica (2.8) popisuje prípad, kedy je teplotné pole časovo závislé. V mnohých simuláčnych programoch sa však využíva úvaha, že teplota sa počas jedného krátkeho kroku nezmení príliš, preto vychádzajú z takzvaného „ustáleného termálneho stavu“, kedy je teplotné pole časovo nezávislé. Aby bol tento stav stály, musia byť aj vnútorné zdroje telesa konštantné. V našom prípade uvažujeme, že stena má $q^* = 0$, kedže neuvažujeme vykurovanie stenami/podlahou. Potom dostávame zjednodušenú rovnicu

$$\nabla^2 \Theta = 0. \quad (2.9)$$

V našom prípade môžeme uvažovať iba jednorozmerný tok tepla, keďže sa jedná o tok medzi dvomi rovnobežnými plochami. Potom sa rovnica (2.6) dá vyjadriť ako

$$\frac{d^2 \Theta(x)}{dx^2} = 0 \Rightarrow \frac{d\Theta(x)}{dx} = \text{konst} \Rightarrow q = -\lambda \frac{d\Theta(x)}{dx} = \text{konst}, \quad (2.10)$$

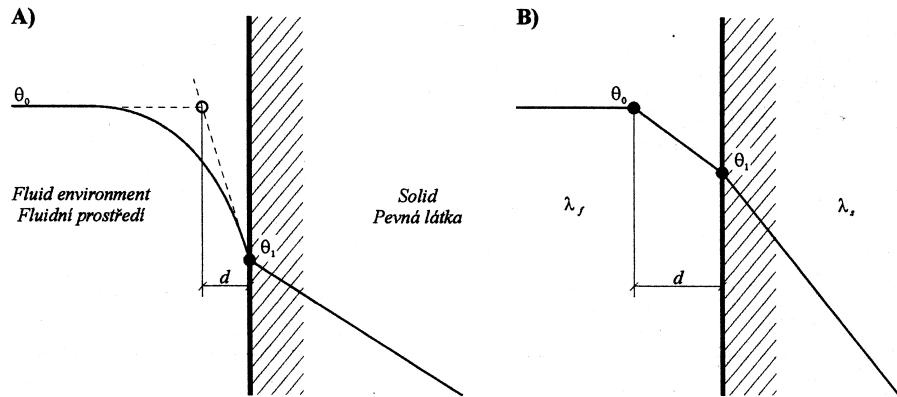
v prípade, že λ sa nebude príliš meniť v závislosti na teplote či vlhkosti. Hustota tepelného toku v jednotlivých zložkách muriva je rovnaká, pretože v ustálenom termálnom stave už nedochádza k ďalšej akumulácii ($Q_{privédene} = Q_{odvedene}$) a plochy jednotlivých prierezov murivom sú rovnaké. Úpravou a integráciou rovnice získame rozloženie teploty v stene

$$\Theta(x) = \Theta_1 - \frac{q}{\lambda} (x - x_1), x \in (x_1, x_2). \quad (2.11)$$

Kde Θ_1 je teplota v mieste x_1 a interval (x_1, x_2) predstavuje priestor kde sa nachádza materiál s danou λ . Vidíme, že priebeh teploty v jednotlivých vrstvách steny popisuje lineárna funkcia.

2.1.2 Prúdenie

Na rozhraní medzi pevnou látkou a tekutinou (vzduchom) nie je teplotný profil $\Theta(x, y, z)$ lineárny. Prenos tepla medzi materiálmi je teda spôsobený nielen vedením, ale aj inými mechanizmami a to prúdením a žiareniom 2.1.3, ktoré môže mať značný vplyv pri prestrepe tepla.



Obr. 2.1: Newtonov ochladzovací zákon - skutočný (A) a approximovaný (B) priebeh
(obrázok prevzatý z (FICKER, T., 2004))

Isaac Newton approximoval tento priebeh v rovnici, známej ako „Newtonov ochladzovací zákon“.

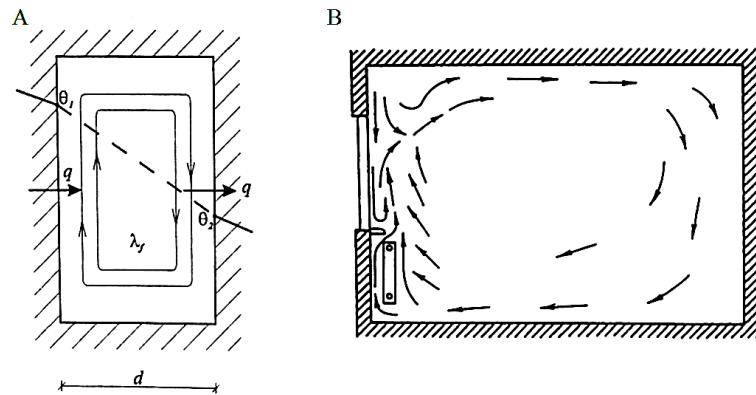
$$q = \frac{\lambda_f}{d} (\Theta_0 - \Theta_1) = h (\Theta_0 - \Theta_1) \quad (2.12)$$

Kde Θ_1 je povrchová teplota pevného materiálu, Θ_0 je teplota tekutého prostredia, d je hrúbka prechodovej vrstvy a $h = \frac{\lambda_f}{d}$ je súčinitel' prestupu tepla. Hodnoty h_k (súčinitel' prestupu tepla konvekciou) pre rôzne kombinácie pevnej a tekutej látky je možné nájsť v tabuľkách. V prípade, že aplikujeme (2.12) pre prenos tepla vo vzduchovej medzere obr. 2.2, vzhľadom na závislosť na type prúdenia (laminárne, turbulentné, ...) môže byť teoretický výpočet h_k problematický, z tohto dôvodu je niekedy výhodnejšie hodnotu zistiť experimentom. Potom je možné uvádzáť celkový súčinitel' prestupu tepla

$$h = h_k + h_r, \quad (2.13)$$

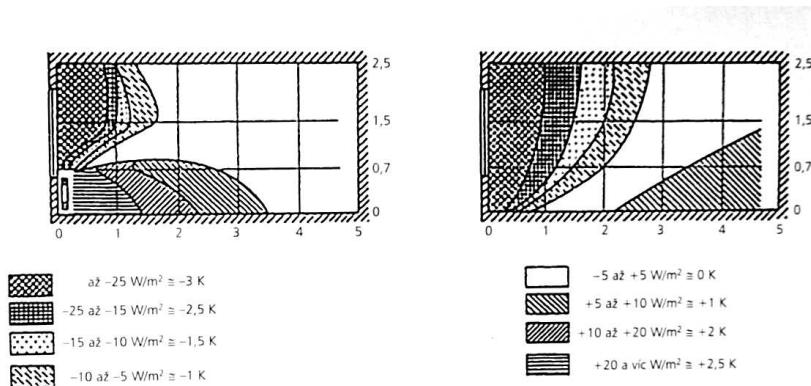
kde zložka h_r predstavuje súčinitel' prestupu tepla žiareniom.

Prúdenie vzduchu a rozdelenie jeho teplôt v miestnosti je komplikované popísat a ešte zložitejšie nasimulovať, pre lepšiu predstavu uvádzam obrázky 2.2 (B) a 2.3 (vpravo



Obr. 2.2: Prúdenie vzduchu v dutine pevného materiálu (A) a v miestnosti ochladzovanej oknom (B)
 (obrázok prevzatý z (FICKER, T., 2004))

miestnosť s vykurovacím telesom pod oknom, vľavo miestnosť ochladzovaná oknom). Podrobnejší fyzikálny popis prúdenia je možné nájsť v (BARTÁK, M., 2010).



Obr. 2.3: Rozloženie teplôt/tepelných tokov v miestnosti oproti priemernej hodnote, vpravo miestnosť s vykurovacím telesom pod oknom, vľavo miestnosť ochladzovaná oknom
(obrázok prevzatý z (PETRÁŠ, D. LULKOVICOVÁ, O. BAŠTA, J. TAKÁCS, J. KABELE, K. a KIRŠ, J., 2005))

2.1.3 Žiarenie

Tepelné žiarenie na svoje šírenie nepotrebuje žiadnu hmotu, keďže je elektromagnetickej povahy. Po dopade na hmotné teleso je energia žiarenia E_i rozdelené na tri časti. Jedna

sa odrazí E_r , druhá je absorbovaná E_a a tretia postupuje skrz teleso ďalej E_d .

$$E_i = E_r + E_a + E_d \Rightarrow 1 = \frac{E_r}{E_i} + \frac{E_a}{E_i} + \frac{E_d}{E_i} \Rightarrow 1 = R + A + D, \quad (2.14)$$

Bezrozmerné koeficienty R, A, D sa nazývajú odrazivosť, pohltivosť a prestupnosť a môžu nadobúdať hodnoty od nula do jedna. Závisia na frekvencii a uhle dopadu žiarenia. Teleso s $R = 1$ bude veľmi svetlé, ak bude mať $A = 1$ nazývame ho dokonale čiernym telesom a ak má $D = 1$ nazývame ho diatermné. V skutočnosti žiadne z týchto „dokonalých“ telies neexistuje. Plyny, ktoré neobsahujú prímesy majú blízko k diatermným telesám, naopak cez pevné látky takmer žiadne žiarenie neprechádza priamo, teda pre ne platí

$$D = 0 \Rightarrow 1 = R + A. \quad (2.15)$$

Tepelné žiarenie je vyžarované každou látkou, ktorá ma teplotu vyššiu ako absolútna nula. Energia je rozdelená medzi žiarenia s rôznymi vlnovými dĺžkami λ a intenzitami i_λ . S najvyššími intenzitami $i_{\lambda b}$ vyžaruje už spomenuté dokonale čierne teleso. Pre nás je podstatná celková energia žiarenia integrovaná cez celú λ . Tú popisuje Stefan-Boltzmanov zákon, ktorý v tvare pre dokonale čierne teleso vyzerá takto:

$$H_b = \sigma T^4 = C_b \left(\frac{T}{100} \right)^4, \sigma = 5.67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}, C_b = 5.67 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}. \quad (2.16)$$

Pre vyjadrenie integrálnej intenzity H aj pre iné ako dokonale čierne teleso môžeme využiť poznatok, že pomer $\frac{H}{A}$ je konštantný. Potom platí

$$H = A \cdot H_b = A \cdot C_b \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4 = C \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (2.17)$$

kde C_b je súčineteľ sálania dokonale čierneho telesa a C šedého telesa.

Aby sme popísali prenos tepla žiareniom medzi dvoma telesami navzájom, musíme okrem žiarenia uvažovať aj odrazy a pohltivosť. Majme dve šedé telesá, ktoré majú tvar rovnobežných rovín, každé s plochou S , rôznymi teplotami $T_1 > T_2$ a priestor medzi nimi je vyplnený diatermným médium, energia žiarenia jednotlivých telies vyjadríme ako:

$$H_1 = C_1 \cdot \left(\frac{T_1}{100} \right)^4, \quad H_2 = C_2 \cdot \left(\frac{T_2}{100} \right)^4. \quad (2.18)$$

Aby sme zahrnuli aj odraz žiarenia, môžeme vyjadriť celkové žiarenie telesa G_1 ako súčet jeho žiarenia H_1 a odrazeného žiarenia $G_2 (1 - A_1)$

$$G_1 = H_1 + (1 - A_1) G_2, \quad G_2 = H_2 + (1 - A_2) G_1. \quad (2.19)$$

Hustotu tepelného toku q_{12} od teplejšej roviny k chladnejšej vyjadríme ako rozdiel medzi intenzitami vyžarovania

$$q_{12} = G_1 - G_2 = \frac{A_2 H_1 - A_1 H_2}{A_1 + A_2 - A_1 A_2} = C_{12} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (2.20)$$

$$C_{12} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_b}}. \quad (2.21)$$

C_{12} je koeficient vzájomného sálania.

Pre praktické výpočty sa rovnica zvykne uvádzať v tvare:

$$q_{12} = C_{12} \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{\Theta_1 - \Theta_2} (\Theta_1 - \Theta_2) = C_{12} \cdot \beta \cdot (\Theta_1 - \Theta_2) = \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{R_r}, \quad (2.22)$$

$$\beta = \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{\Theta_1 - \Theta_2}, \quad R_r = \frac{1}{C_{12} \beta}. \quad (2.23)$$

β je teplotne závislá funkcia a R_r je teplotne závislý odpor, ktorý zodpovedá žiareniu medzi dvomi paralelnými plochami.

Pre prípad, že teploty $T_1 \approx T_2$ môžeme odpor R_r approximovať takto

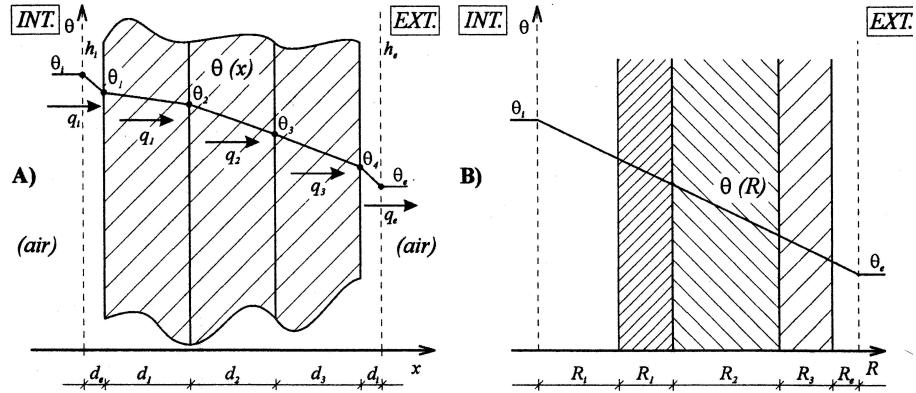
$$R_r = \frac{1}{C_{12} \beta} \approx \frac{2,5 \cdot 10^7}{C_{12} \bar{T}^3} m^2 \cdot K \cdot W^{-1}, \quad (2.24)$$

kde \bar{T}^3 je priemerná teplota oboch plôch.

2.1.4 Tepelný tok v stenách

Vezmieme si príklad obvodovej steny obr. 2.4, ktorá je zložená z troch vrstiev, ktoré sú charakterizované ich hrúbkami (d_{1-3}) a súčinom tepelnej vodivosti (λ_{1-3}). Na oboch stranach steny sa nachádza prechodová vrstva do vzduchu, ktorá je popísaná príslušným súčinom prestupu tepla ($h_{1,2}$). Stena neobsahuje zdroje tepla/chladu a je vystavená ustálenému termálnemu stavu, to znamená, že teplota exteriéru Θ_e i teplota interiéru Θ_i sú konštantami. V takomto prípade je hustota tepelného toku vo všetkých miestach i v prechodových vrstvách rovnaká.

$$q = q_i = q_1 = q_2 = q_3 = q_e \quad (2.25)$$



Obr. 2.4: Obvodová stena a jej tepelný profil
(obrázok prevzatý z (FICKER, T., 2004))

Hustotu tepelného toku vyjadríme samostatne pre jednotlivé vrstvy pomocou (2.5) a (2.12)

$$\left. \begin{array}{l} q_i = h_i(\Theta_i - \Theta_1) \\ q_1 = \frac{\lambda_1}{d_1} (\Theta_1 - \Theta_2) \\ q_2 = \frac{\lambda_2}{d_2} (\Theta_2 - \Theta_3) \\ q_3 = \frac{\lambda_3}{d_3} (\Theta_3 - \Theta_4) \\ q_e = h_e(\Theta_4 - \Theta_e) \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{ll} \Theta_i - \Theta_1 & \frac{q_i}{h_i} \\ \Theta_1 - \Theta_2 & \frac{q_1 d_1}{\lambda_1} \\ \Theta_2 - \Theta_3 & \frac{q_2 d_2}{\lambda_2} \\ \Theta_3 - \Theta_4 & \frac{q_3 d_3}{\lambda_3} \\ \Theta_4 - \Theta_e & \frac{q_e}{h_e} \end{array}, \quad (2.26)$$

$$\Theta_i - \Theta_e = q_i \frac{1}{h_i} + q_1 \frac{d_1}{\lambda_1} + q_2 \frac{d_2}{\lambda_2} + q_3 \frac{d_3}{\lambda_3} + q_e \frac{1}{h_e}, \quad (2.27)$$

$$q = \frac{\Theta_i - \Theta_e}{\frac{1}{h_i} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{1}{h_e}} = \frac{\Theta_i - \Theta_e}{R_{tot}}. \quad (2.28)$$

Pre n-vrstvú stenu potom môžeme písť

$$R_{tot} = R_i + R + R_e, \quad (2.29)$$

$$R_i = \frac{1}{h_i}, R = \sum_{j=1}^n = \frac{d_j}{\lambda_j}, R_e = \frac{1}{h_e}. \quad (2.30)$$

Kde R_i je povrchový tepelný odpor vnútorného povrchu a R_e vonkajšieho povrchu. Tieto sú dôležité z dôvodu, že v zahraničnej literatúre a už i v aktuálnej tuzemskej literatúre sa používa namiesto tepelného odporu súčiniteľ prestupu tepla U , ktorý v sebe už zahŕňa odpory prechodových vrstiev

$$q = U(\Theta_i - \Theta_e), U = \frac{1}{R_{tot}} (W m^{-2} K^{-1}). \quad (2.31)$$

2.1.5 Tepelná ochrana budov

Tabuľka 2.1: Prehľad požadovaných hodnôt U ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) konštrukcií

Typ konštrukcie	Norma z roku			
	1964	1977	1994	2007
Podlaha príahlá k zemi	1.46	0.89	0.46	0.85
Strop medzi vykur. a nevykur. miestnosťou	1.14	1	0.72	0.6
Strop medzi vykur. miestnosťami	-	-	2	2.2
Vonkajšia stena	1.46	0.89	0.46	0.38
Vnútorná stena medzi vykur. a nevykur. miest.	2.13	1.81	0.72	0.6
Vnútorná stena medzi vykur. miestnosťami	-	-	2.5	2.7
Strecha do 45°	0.9	0.5	0.37	0.24
Okno	-	3.7	2.9	1.8

Je českou technickou normou s označením ČSN 73 0540. Stanovuje tepelne technické požiadavky pre budovy, majúce požiadavky na vnútorné prostredie. Norma má zaistiť úsporu energie a vzťahuje sa na takmer všetky typy budov.

Táto norma existuje od roku 1969 a bola postupne novelizovaná, v tejto sekcii uvádzam prehľad zmien požiadavkov v jednotlivých vydaniach. To nám dá predstavu o tom, s akými budovami, respektívne s akou úrovňou tepelnej ochrany sa môžeme pri riešení problému vykurovania stretnúť. Staršie normy uvádzali požiadavky v iných jednotkách, takže pre prehľadnosť som tieto hodnoty prepočítal na tie, používané v súčasnosti. Výsledné hodnoty podľa vybraných typov konštrukcie a roku požiadavku uvádzam v tabuľke 2.1.

2.2 Modelovacie prostredia

Programy na simuláciu budov môžeme rozdeliť podľa ich primárneho určenia na zaobrajúce sa

- analýzou celej budovy - spotreba energií, výpočet potrebných výkonov na vykurovanie/chladenie, využitie obnoviteľných zdrojov; ESP-r, ENERGY+, IES, ECO-TEC, ...
- analýzou jednotlivých komponent - HVAC, osvetlenie; TRNSYS, PVsol, ...

- analýzou iných hľadísk - znečistenie ovzdušia, ekonomika energií, kvalita vzduchu, prúdenie vzduchu; CFD, ...

Na základe doporučení som si zvolil, program TRNSYS, ktorý má oproti ENERGY+ výhodu intuitívnejšieho ovládania a jednoduchšieho prepojenia s Matlabom. Ešte predtým som testoval vhodnosť prostredia IBPT (International Building Physics Toolbox), ktoré sa ukázalo pri modelovaní viac než troch prepojených miestností výpočetne veľmi náročne a v niektorých situáciách matematicky nestabilné.

2.2.1 Trnsys všeobecne

Simulačný program TRNSYS (A TRAnsient SYstems Simulation Program) je určený na simuláciu tepelných javov v energetických systémoch budov. Tvorba modelu v TRNSYS-e je podobná napríklad postupu v simulinku, využívame prvky z knižníc, ktoré spájame prepojením príslušných vstupov a výstupov. Jednotlivé prvky sú nastaviteľné pomocou parametrov. Samotná simulácia prebieha iteračnou metódou s časovým krokom, ktorý si užívateľ zvolí. Základné knižnice obsahujú prvky popisujúce: reguláciu, hydrauliku, foto-voltaiku, vykurovanie, vetranie, fyzikálne javy, spracovanie dát, grafy, prvky umožňujúce výmenu dát s iným programom (Ms Excel, MATLAB, ...) a iné. Užívateľ si môže naprogramovať aj vlastné prvky, v prípade, že ovláda FORTRAN, jazyk na ktorom je postavený TRNSYS.

2.2.2 Type 56

V TRNSYS-e, verzia 1.16, je budova popísaná modelom „TYPE 56“. Informácie o ňom som čerpal z manuálu TRNSYS-u. Jedná sa o model, ktorý zanedbáva geometriu, prúdenie vzduchu a vzduch v miestnosti je modelovaný iba ako jeden uzol, do ktorého patrí aj tepelná kapacita zariadenia a nábytku. Teplo v miestnosti sa mení vždy po simulačných krokoch podľa tepelného toku do/z daného uzlu. Celkový tepelný tok do uzlu miestnosti je počítaný ako súčet

1. ziskov z okolitých povrchov,
2. ziskov zo zdrojov v miestnosti ako ľudia, vybavenie, osvetlenie a vykurovacie telesá,
3. ziskov z infiltrácie,

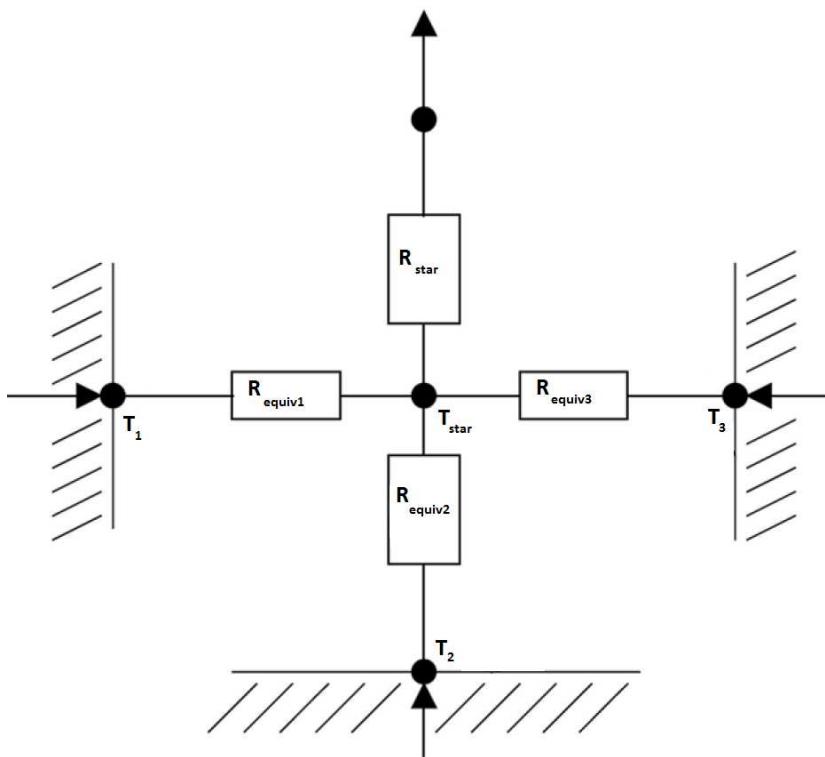
4. ziskov z vetrania

5. a ziskov spôsobených prúdením vzduchu z miestnosti do miestnosti.

Tepelný tok je v posledných troch prípadoch počítaný ako

$$\dot{Q} = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in}) . \quad (2.32)$$

Kde \dot{V} je objemový tok, ρ je hustota a c_p je merná tepelná kapacita vzduchu a výraz v zátvorke predstavuje rozdiel teplôt vzduchu v miestnosti a vzduchu vstupujúceho do miestnosti.



Obr. 2.5: Hviezdicová siet pre miestnosť s tromi povrchmi

Na uzly okien a stien okrem toku prestopujúceho z okolitého vzduchu pôsobí aj žiarenie z okolitých stien a slnečné žiarenie. U jednotlivých povrchov je možné nastaviť rôznu pohltivosť, alebo ponechať základné nastavenie, ktoré energiu rozloží medzi jednotlivé povrchy miestnosti rovnomerne. Steny, obsahujú značné množstvo hmoty, preto majú podstatne vyššiu tepelnú kapacitu a na rozdiel od vzduchu v miestnosti sa ich hmota nemôže premiešať. Preto je chovanie stien v rámci jednotlivých simulačných krokov reprezentované prenosom v z-transformácii, koeficienty prenosu a ich počet si program

vypočíta podľa tepelnej kapacity príslušnej steny a simulačného kroku. Tento prenos modeluje iba tepelný tok v jednom smere na rozdiel od reality, kedy hlavne po obvode steny je vedenie tepla 2-dimenzionálne a v rochoch 3-dimenzionálne (2.8). Vzhľadom na fakt, že model nie je geometrický, teplo ktoré je prenesené vedením, medzi susediacimi stenami (2, 3-D) je zanedbané. Ďalším zjednodušením oproti skutočnosti je, že je zanedbaná závislosť súčiniteľa tepelnej vodivosti na vlhkosti (2.2).

Vzájomná výmena energie stien medzi sebou a úniky cez okná do exteriéru je modelovaná pomocou hviezdicovej topológie, tak ako vidíme na obrázku 2.5. Jej výhodou je, že môžeme použiť celkový koeficient prestupu tepla (2.13). Na to aby sa tento kombinovaný koeficient mohol použiť musí byť tepelný rozdiel pre sálanie aj vedenie rovnaký. Toto je dosiahnuté vytvorením uzla s fiktívou teplotou T_{star} .

Samotné okno je modelované takým počtom uzlov aký je počet skiel. Okrajové sklá vyžarujú do exteriéru/interiéru a časť žiarenia z exteriéru/interiéru pohlcujú, zvyšok odrážajú. Sklá si medzi sebou energiu odovzdávajú žiareniom, prúdením vzduchu v medzere a vedením, ktoré prebieha v ráme.

Vlhkosť v budove môže byť uložená iba vo vzduchu, alebo je možné využiť zložitejší model, ktorý počíta s uložením vlhkosti do povrchu steny a do muriva. V prípade využitia druhého modelu je ale potrebné pre každú miestnosť manuálne spočítať kapacitu vlhkosti pre každú miestnosť podľa typov materiálov.

2.2.3 Úroveň detailnosti použitého simulačného modelu

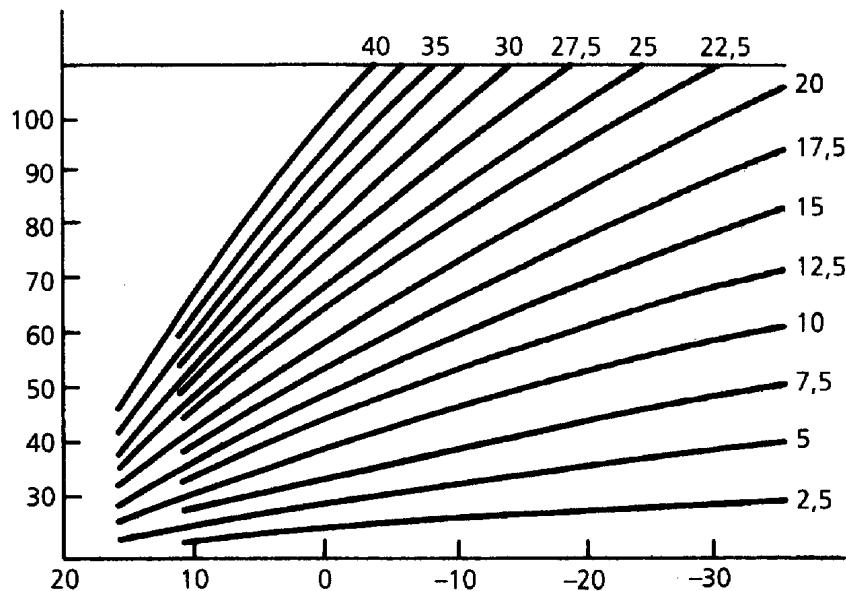
V simulačnom modeli sú zanedbané hlavne tieto javy:

- Trnsys zanedbáva pôsobenie vetra
- Trnsys neumožnuje modelovať otváranie dverí, vetranie oknami považujem za konštantné.
- Trnsys používa jednoduchú skladbu konštrukcií a 1D vedenie tepla. Tepelné mosty som zanedbal.
- Trnsys nepočíta s reálnym prúdením vzduchu v miestnosti.
- Zanedbal som pôsobenie ľudí, osvetlenia, varenia, či iných tepelných ziskov.
- Použil som rovnaký faktor viditeľnosti oblohy pre všetky vonkajšie povrchy
- Zanedbal som závislosť prietoku vzduchu okolo vykurovacích telies na rozdielne teplôt.

- Vykurovaciu sústavu som modeloval zjednodušene, dochádza k skokovým zmenám riadiacej veličiny, je zanedbaná zotrvačnosť systému a termohydraulika sústavy.
- Zanedbal som, že niektoré povrchy môžu zatíňovať iné podľa pozície slnka.
- Prízemne poschodie modelujem ako tesne na povrchu, hoci je čiastočne zapustené do zeme.

2.3 Regulácia

2.3.1 Ekviterma



Obr. 2.6: Príklad vykurovacích kriviek
(obrázok prevzatý z (PETRÁŠ, D. LULKOVÍČOVÁ, O. BAŠTA, J. TAKÁCS, J. KABELE, K. a KIRŠ, J., 2005))

Výkon dodávaný do budovy je závislý na teplote vykurovacej vody. Hlavným princípom ekvitermej regulácie, je, že teplota topnej vody je funkciou vonkajšej teploty. Ekvitermnú krivku je pred použitím potrebné správne nastaviť. Aby sme to dosiahli je potrebné vykonať pokus, pri ktorom postupne zistujeme vhodné teploty a k nim priradzujeme krivku

regulátora. Výsledná ekviterma bude vyzerať napríklad takto 2.6. Výhodou ekvitermy je, že pokiaľ nepotrebujeme meniť teplotu v miestnosti, teda nevyužívame nočný útlm je funkčná bez spätej väzby. V prípade útlmu je potrebné na noc odstaviť čerpadlo, pokým teplota v referenčnej miestnosti prekračuje útlmovú teplotu. Ak by sme nepoužili spätnú väzbu mohol by nastať stav, že by sa miestnosti vychladil príliš a následný ohrev by trval pridlho.

2.3.2 PID

Táto metóda riadenia využíva na výpočet akčného zásahu regulačnú odchýlku e , čo je rozdiel medzi výstupom systému a referenciou. Názov tejto metódy vznikol podľa názvov jednotlivých zložiek výsledného riadiaceho signálu.

- Proporčná

$$u_P = K_P e \quad (2.33)$$

- Integračná

$$u_I = K_I \int e dt \quad (2.34)$$

- Derivačná

$$u_D = K_D \frac{de}{dt} \quad (2.35)$$

Spojením týchto zložiek dostávame celkový riadiaci signál

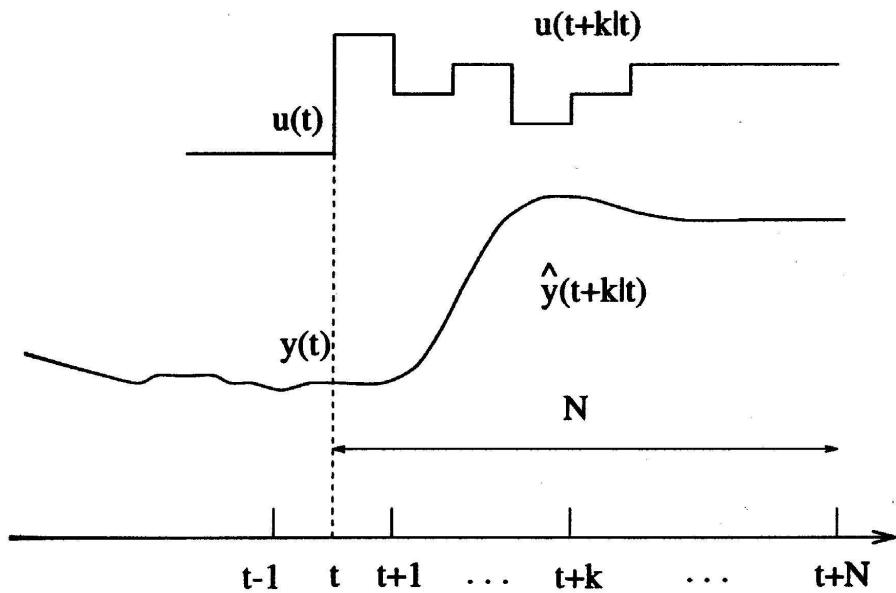
$$u = u_0 + K_P e + K_I \int e dt + K_D \frac{de}{dt} \quad (2.36)$$

Viac informácií o PID regulácii je možné nájsť napríklad v (ASTROM, K. MURRAY, R., 2008).

2.3.3 MPC

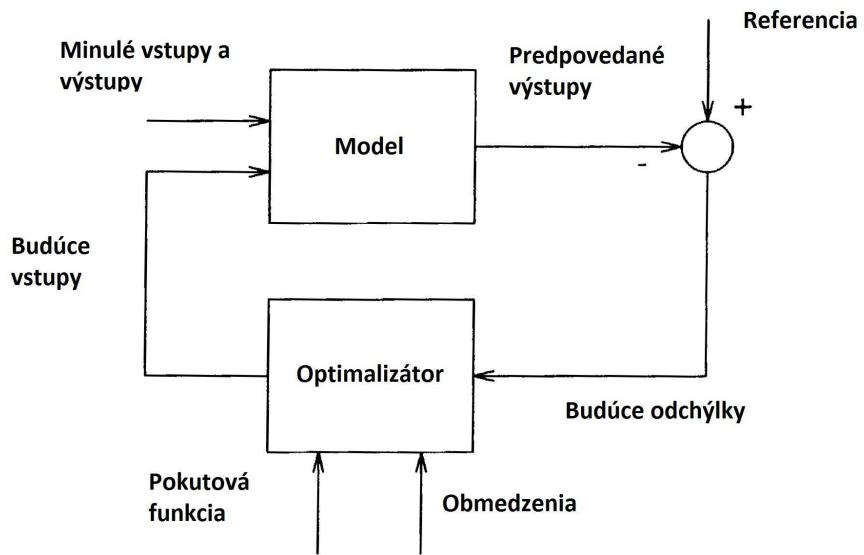
Metóda Model (Based) Predictive Control (MPC, niekedy aj MBPC) vznikla koncom sedemdesiatych rokov. Tento termín neoznačuje konkrétnu stratégiu riadenia, ale širokú škálu stratégií, ktoré spája metóda využívania modelu riadeného procesu na získanie riadiaceho signálu minimalizáciou určitého kritéria.

Základná metóda MPC je zobrazená na obrázku 2.7 a môžeme ju popísat nasledujúcimi tromi krokmi:



Obr. 2.7: Základná metóda MPC
(obrázok prevzatý z (CAMACHO, E. F. a BORDONS, C., 1999))

1. Budúce výstupy pre vopred určený predikčný horizont N sú predpovedané v každom kroku t pomocou modelu procesu. Tieto výstupy $y(t+k|t)$ pre $k = 1 \dots N$ sú závislé na predošlých hodnotách riadiacich signálov až do času t a na budúcich vstupoch $u(t+k|t)$, kde $k = 0 \dots N - 1$, ktoré budú vypočítané.
2. Budúce riadiace signály sa vypočítajú optimalizáciou určitého kritéria, aby sa rozdiel medzi výstupom a referenciou bol čo najmenší. Toto kritérium zvykne mať tvar kvadratickej funkcie odchýlky predpovedaných výstupov a požadovanej referencie. Vo väčšine prípadov je veľkosť akčného zásahu súčasťou kritéria. Ak je kritérium kvadratické, model je lineárny a veľkosť vstupov, stavov ani výstupov nie je obmedzená je možné vypočítať jednoznačné riešenie. V opačnom prípade je potrebné kritérium optimalizovať iteratívne.
3. Riadiaci signál ($u(t|t)$) je odoslaný do procesu a zvyšok riadiacich signálov sa „zahodí“, pretože už budeme poznáť $y(t+1)$ a pokračujeme od prvého kroku. Tým získame $u(t+1|t+1)$, ktorý pravdepodobne bude iný než $u(t+1|t)$, pretože na jeho výpočet použijeme novšiu informáciu. Toto sa nazýva princípom posuvného horizontu.



Obr. 2.8: Klasická štruktúra MPC
(obrázok prevzatý z (CAMACHO, E. F. a BORDONS, C., 1999))

Teoretický úvod k metóde MPC prevzatý a preložený z (CAMACHO, E. F. a BORDONS, C., 1999).

2.4 Norma pre tepelný komfort

Označenie normy je ČSN EN 15251. V prílohe F sú spomenuté tri metódy dlhodobého hodnotenia podmienok tepelného komfortu. Sú to:

- Percento mimo rozsah - vypočíta sa počet percent, z obsadených hodín kedy je teplota v miestnosti mimo požadovaný rozsah.
- Kritérium váženého PPD - nová komplexná metóda, ale na výpočet tejto varianty je potrebné poznať intenzitu prúdenia vzduchu..
- Kritérium hodinostupňov - Doba behom ktorej teplota v miestnosti prekročí stanovené hranice je vážená veľkosťou odchýlky.

Pri hodnotení výsledkov v tejto práci použijem posledné kritérium, navyše ešte teplotty okolo požadovanej hodnoty rozdelím do siedmich intervalov, aby sme mohli porovnať, rozloženie teplôt počas vykurovacej sezóny.

Kapitola 3

Implementácia

3.1 Popis simulačného modelu

3.1.1 Obálka budovy

Tabuľka 3.1: Prehľad parametrov použitých konštrukcií

Typ konštrukcie	d_{nos} (mm)	d_{izol} (mm)	U ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)
Podlaha prilahlá zemi	200	22	0.85
Podlaha izolovaná	200	50	0.6
Podlaha neizolovaná	200	3	2.2
Obvodová stena	360	40	0.38
Vnútorná izolovaná stena	176	50	0.6
Vnútorná neizolovaná stena	176	0	2.7
Strecha plochá	200	150	0.24
Strecha šikmá	5	154	0.24

Pôdorysy jednotlivých poschodí modelovaného domu je možné nájsť v prílohe. Skladá sa zo 4 poschodí, z ktorých sú horné tri vykurované. Na spodnom poschodí sa nachádzajú nevetrané miestnosti. K vstupu určitého množstva vzduchu z exteriéru však dochádza. Toto množstvo som vypočítal zo vzorca

$$\dot{V} = i \cdot L \cdot \Delta p^{0.67} \quad (\text{m}^3\text{s}^{-1}) \quad (3.1)$$

Kde L je dĺžka špár okna a hodnoty špárovej priezdušnosti i a tlaku p je možné nájsť v tabuľkách. Pre vykurované poschodia som tento vzorec využil k výpočtu prietoku vzduchu medzi miestnosťami, keďže tie sú vetrané s konštantnou intenzitou, ktorá je omnoho

Tabuľka 3.2: Prehľad vlastností miestností

Miestnosť	Objem (m ³)	Veľkosť otvorov (m ²)	Orientácia
1JZ	87.6	6	juho-západ
1J	96	8.4	juh
1JV	73.2	8.3	juho-východ
1SV	69	3	severo-východ
1S	62.4	2	sever
2JZ	87.6	6	juho-západ
2J	96	8.4	juh
2JV	100.5	8.3	juho-východ
2SV	57	3	severo-východ
2S	62.4	2	sever
3JZ	56	2	juho-západ
3J	60	3.4	juh
3JV	68	2	juho-východ
3SV	16	1	severo-východ
3S	60	2.4	sever

vyššia než intenzita prirodzeného vetrania špárami. Podľa českých noriem je treba počítať minimálne s 50% výmenou objemu vzduchu za hodinu. Výpočty pre jednotlivé okná a tok vzduchu medzi miestnosťami je možné nájsť na priloženom nosiči.

Tabuľka 3.3: Súčiniteľ prechodového odporu

Povrch	h (m ² K W ⁻¹)
Horizontálna povrch	0.13
Strop	0.1
Podlaha	0.17
Vonkajšia stena	0.04
Vetraná štrbina	0.13

Pri modelovaní jednotlivých konštrukcií som umiestňoval izolačné materiály do exteriéru a v prípade horizontálnych stien na podlahovú stranu. Konštrukcie sú modelované ako poskladané rovnomerné vrstvy jednotlivých zložiek. Napríklad u strechy som si hrúbku drevenej vrstvy určil tak, že som si spočítal jednotkový objem, ktorý krokvy

zaberajú na 1 m^2 a tak som získal odpovedajúcemu hrúbku drevenej vrstvy. Vychádzal som z prierezu krokvy $120 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ a rozponu 4 m. Hrúbky izolácií som nevolil podľa reálne používaných rozmerov, ale tak, aby sa hodnoty U čo najviac blížili normovým hodnotám podľa (*ČSN 73 0540-2, 2007*). U každej z konštrukcií je potrebné zadefinovať súčiniteľ prestupu tepla prechodových vrstiev na oboch stranach. Tieto hodnoty je možné nájsť napríklad v (*ČSN 73 0540-3, 2005*), použité hodnoty uvádzam v tabuľke 3.3.

Veľkosti jednotlivých povrchov v budove by nemalo zmysel vypisovať, je možné si ich nájsť v modeli. Pre vnútorné povrhy je okrem ich povrchu uvedená aj zóna s ktorou susedia a ich orientácia, keďže stena nemusí byť symetrická. U externých stien je okrem povrchu uvedená aj orientácia 3.4 a faktor viditeľnosti oblohy, ktorý je u celej budovy rovnaký a pomerne vysoký, to znamená, že budovu beriem akoby bola v nezastavanom území, tým sa vplyv počasia na budovu zväčší.

Tabuľka 3.4: Použité orientácie povrchov

Orientácia	Azimut	Sklon
Sever	180	90
Juh	0	90
Východ	-90	90
Západ	90	90
Sever šikmo	180	44
Juh šikmo	0	44
Východ šikmo	-90	44
Západ šikmo	90	44
Horizontálne	0	0

Schodisko nie je medzi poschodiami delené dverami, dvere sa nachádzaju iba pri vstupe do jednotlivých miestností. Avšak je rozdelené na tri zóny podľa poschodia, aby som umožnil aspoň čiastočné vrstvenie teplôt a vplyv toku vzduchu. Hranicu medzi zónami schodiska simuluje fiktívne okno.

U okien som si vybral typ zasklenia z knižnice, tak aby bol čo najbližší normovej hodnote a podiel plochy rámu je 15%, u ktorého som použil $U = 2 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Kedže do otvoru konštrukcie je možné vkladať iba okno, dvere som simuloval dosadením požadovaných parametrov za parametre rámu a nastavil podiel plochy rámu a zasklenia na 99% a 1%, v prípade, že som použil rám pre 100% plochy TRNSYS vyhlásí chybu. Pre interiérové dvere som použil hodnotu $U = 8.17 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, ktorá nie je normou pevne sta-

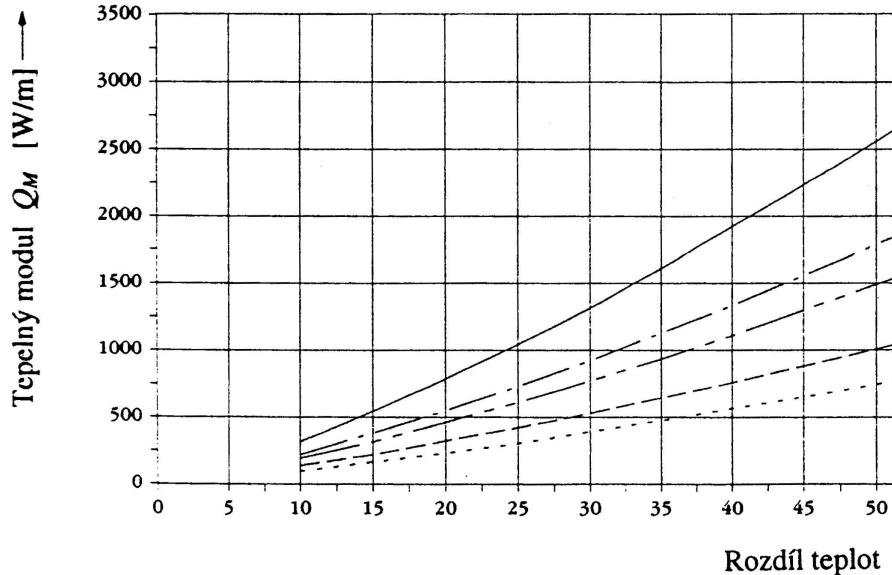
novená. Hodnotu tepelnej vodivosti pre exteriérove dvere som použil $U = 1.7 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

3.1.2 Vykurovanie

Tabuľka 3.5: Inštalovaný výkon pri spáde 75/65/20

Miestnosť	Inštalovaný výkon (kW)
1JZ	2.56
1J	2.23
1JV	2.01
1SV	1.81
1S	1.51
2JZ	1.09
2J	0.99
2JV	1.06
2SV	0.60
2S	0.66
3JZ	0.80
3J	0.82
3JV	0.69
3SV	0.27
3S	0.96
Celkovo	18.06

Do každej z vykurovaných miestností v Type56 je vstupom vykurovací výkon príslušnej miestnosti. Ten je rozdelený na dve zložky konvektívnu a radiačnú v pomere 7 ku 3. Pre každú miestnosť je dodaný výkon simulovaný samostatne pomocou bloku Type5, ktorý modeluje tepelný výmenník, v ktorom sú prúdy tekutín na seba kolmé. Vďaka tomu je dodávaný výkon závislý nielen na teplote vykurovacej vody, ale aj na teplote vzduchu v miestnosti. Prietok vody telesom uvažujem konštantný pre teplotu vykurovacej vody väčšej než 25°C , pri nižšej teplote je prietok nulový. Namodelovať doстаточно presný termo-hydraulický model potrubia by bolo náročné hlavne z hľadiska výpočtového výkonu. Z podobného dôvodu uvažujem prietok vzduchu cez vykurovacie teleso ako konštantný. Ten sa samozrejme v praxi s rozdielom teplôt kvapalín mení. Potom sa závislosť modelovaného výkonu telesa stáva takmer lineárna, na rozdiel od reálnej



Obr. 3.1: Závislosť výkonu plochých telies na rozdielne teplote tekutín
(obrázok prevzatý z (BAŠTA, J., 2001))

závislosti, ktorú môžeme vidieť na obrázku 3.1. Pomer prietokov a účinnosť telesa som si určil experimentálne, tak aby som dostał tepelný spád 75/65/20. Menovité výkony v jednotlivých miestnostiach sú uvedené v tabuľke 3.5. Pre jednotlivé telesá v modele potom platí, že čím väčší menovitý výkon, tým väčší prietok vykurovacej vody a vzduchu cez teleso. Celkový dodávaný tepelný výkon do sústavy potom získavam podľa vzorca

$$\dot{Q} = c \cdot \dot{m} \cdot (T_{vykurovacia} - T_{spiatocka}), \quad (3.2)$$

kde \dot{m} je hmotnostný prietok sústavou, c merná tepelná kapacita vody a $T_{spiatocka}$ je celková teplota vody vystupujúcej z telies po zmiešaní. V každom zmiešavacom uzle platí

$$\dot{m}_{out} = \dot{m}_{1in} + \dot{m}_{2in}, \quad T_{out} = \frac{T_{1in} \cdot \dot{m}_{1in} + T_{2in} \cdot \dot{m}_{2in}}{\dot{m}_{out}}. \quad (3.3)$$

Predpokladám, že systém bude mať vždy dostatočný výkon, aby dodával vykurovaciu vodu požadovanej teploty. Neuvažujem teda stav, ku ktorému v praxi niekedy dochádza, že hoci je požiadavka na vykurovanie, vykurovacia voda nemá požadovanú teplotu, lebo výkon kotla je spotrebovávaný na ohrev TUV, ktorá má v danom systéme vyššiu prioritu.

Na rozdiel od praxe je jediným akčným zásahom ovplyvňujúcim výkon vykurovacej sústavy teplota vykurovacej vody. Prvky ako termostatická hlavica prípadne trojcestný zmiešavací ventil považujem za opravné mechanizmy, ktoré by netreba použiť, ak sústava funguje uspokojivo.

3.1.3 Počasie a okrajové podmienky

Pod spodným poschodom je pôda, ktorej teplotu modelujem pomocou bloku Type77. Teplota sa počas roka plynule mení od 7°C až do 13°C a najnižšiu hodnotu nadobúda koncom januára, čo približne zodpovedá realite v našom podnebí.

Počasie je načítavané pomocou bloku Type109-TMY zo súboru s historickými dátami pre Prahu. Tento blok zároveň po zadaní azimutu a sklonu jednotlivých orientácií vypočítava hodnoty solárneho žiarenia dopadajúce na povrhy s príslušnou orientáciou z tabuľky 3.4. Vstupom pre model je okrem intenzity solárneho žiarenia a teploty vzduchu aj relatívna vlhkosť vzduchu.

Efektívnu teplotu oblohy, ktorá je veľmi dôležitá pre bilanciu vyžarovania budovy modeluje blok Type69b, podľa vlhkosti vzduchu a teploty.

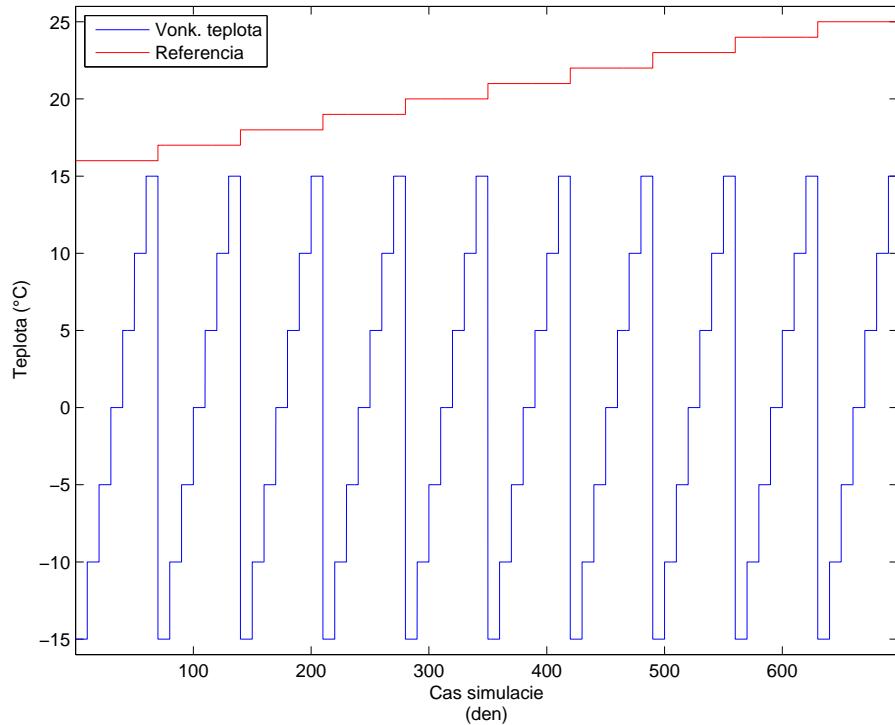
Dĺžka vykurovacej sezóny pre Prahu je podľa rôznych zdrojov 200 až 220 dní. Simulácie som vykonával pre časové obdobie od 2. októbra do 30. apríla, neprestupného roku, čo odpovedá 210 dňom. Priemerná teplota počas vykurovacej sezóny v Prahe je 4°C .

3.2 Regulátory

Všetky regulátory, ktoré som navrhol pracujú s periódom 15 minút. Výstupný signál sa mení skokovo. Teplota vykurovacej vody je obmedzená na $t_{vyk} \in \langle 24.9; 80 \rangle^{\circ}\text{C}$, ale iba pre $t_v \in \langle 25; 80 \rangle^{\circ}\text{C}$ dochádza k prúdeniu vody v systéme.

3.2.1 Ekviterma

Aby som získal dátu pre nastavenie ekvitermných kriviek, do modelu som pustil vstupné dátá z obrázku 3.2 a využil som možnosť, že vykurovanie zabezpečoval priamo Type56. Časový úsek medzi každou zmenou je 10 dní. Na konci tohto úseku som si zapísal dátu o výkone dodávanom do jednotlivých miestností. Tieto výsledky som využil na nastavenie výkonov telies pre jednotlivé miestnosti. Ale ukázalo sa, že pri neustále sa meniaci vonkajšej teplote bolo potrebné vykurovací výkon prvho poschodia zvýsiť na 140% hodnoty, ktorú som získal spomínaným pokusom a na ostatných poschodiach som výkon úmerne znížil, tak aby sa celkový dodaný výkon nezmenil. Celkové výkony som pomocou regresora approximoval tak, že som uvažoval kvadratickú závislosť teploty vykurovacej vody na jednotlivých parametroch (referencia, vonkajšia teplota) a výsledná ekviterma je zo-



Obr. 3.2: Dáta na identifikáciu ekvitermy

brazená na obrázku 3.3. Vykurovacia krvka pre požadovanú teplotu $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ vyzerá takto

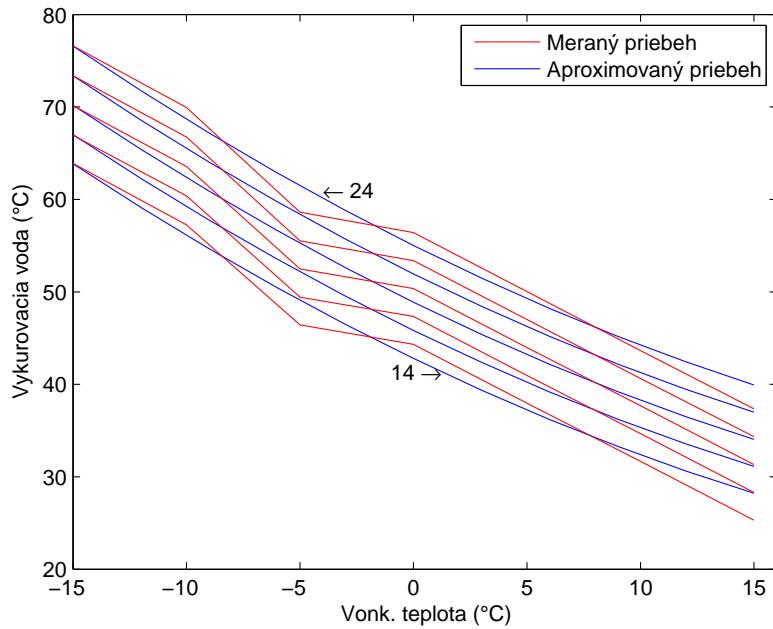
$$t_{vyk} = (0.0144t_{amb} - 1.2t_{amb} + 48.88)\text{ }^{\circ}\text{C}. \quad (3.4)$$

Na zabezpečenie útlmového režimu som využil postup popísaný v 2.3.1. Pokiaľ som v čase útlmu nevypol vykurovanie, ale dodával vykurovaciu vodu podľa referencie, takmer nedošlo k poklesu teploty.

3.2.2 PID

Vzhľadom na fakt, že sa jedná o pomerne pomalý termálny systém, nevyužívam derivačnú zložku regulátora. Zvyšné dve zložky som nastavil pokusne pre režim s útlmom, tak aby nedošlo k oscilácii. Aby som zabezpečil antiwind-up ochranu v každom kroku najprv skontrolujem či platí,

- v miestnosti je chladnejšie ako referencia a $t_{vyk} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- alebo v miestnosti je teplejsie ako referencia a $t_{vyk} = 24.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,



Obr. 3.3: Namerané hodnoty a aproximovaná ekviterma

nedochádza k integrácii a akčný zásah sa nezmení. V prípade, že ani jedna z podmienok nebola splnená je vypočítaný nový akčný zásah. Po vypočítaní sa ešte skontroluje, či patrí do povoleného intervalu.

3.2.3 MPC

Dĺžku predpovedného horizontu som zvolil ako $N = 72$, čo odpovedá 18 hodinám, keďže predpokladám, že dom je trvalo obývaný a nedochádza k útlmovým obdobiam dlhším než pol dňa.

Predpoved' počasia je pre nás merateľnou poruchou a optimalizačnej funkciu ju zadám ako vstup, ktorý má však veľmi tesné hranice. Preto ho nie je možné upraviť a optimalačná funkcia ho berie ako daný.

Akčný zásah $u(t) = [t_{amb}, t_{vyk}]^T$ získavam minimalizáciou výrazu

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=k}^{k+N} (\hat{y}^T(i) \cdot Q(\hat{y}(i) - ref(i)) + t_{vyk}^2(i) \cdot R); \quad R, Q > 0 \quad (3.5)$$

, pričom musí platiť:

$$t_{vyk}(t) \in \langle 24.9; 80 \rangle, t_{amb}(t) = t_{predpoved}(t); t \in \langle 0; \infty \rangle \quad (3.6)$$

Pre útlmový režim vytváram pokutové matice vždy nanovo, keďže koeficienty Q_1, R_1 pre komfortnú časovú oblasť a Q_2, R_2 pre útlmovú časovú oblasť sú rozdielne. Pomery medzi koeficientami som nastavoval s cieľom, aby bola zabezpečená čo najmenšia odchýlka teploty počas doby kedy je referencia rovná komfortnej hodnote.

3.2.3.1 Návrh modelu

Na návrh modelu som využil identifikačný toolbox Matlabu, ale aby bol model použiteľný a jednotlivé stavy mali určitý fyzikálny význam, nebolo ho možné použiť hned. Preto som si pripravil základnú štruktúru modelu a potom nechal na základe metódy PEM (prediction-error minimization) dopočítať niektoré konštanty.

Po pár pokusoch o vytvorenie modelu sa mi najviac osvedčil model tretieho rádu, kde

- stavové premenné budú teplota v referenčnej miestnosti t_{miest} , ktorá je zároveň riadenou veličinou. Teplota obvodového plášťa budovy t_{vonk} a teplota vnútorných stien t_{vnut} sú nemerateľné stavy,
- teplota vykurovacej vody t_{vyk} je riadiaca veličina a
- teplota vzduchu v exteriéri t_{amb} je merateľná porucha.

Na začiatku vychádzam z popisu toku tepelných energií v okolí referenčnej miestnosti za jeden časový krok. Jednotlivé energie som si označil takto:

- E_{miest} je energia vo vzduchu miestnosti ,
- E_{vonk} je energia uložená v obvodovom plášti budovy,
- E_{vnut} je energia uložená v stenách, ktorými miestnosť susedí s priestormi s dlhodobo podobnou/rovnakou teplotou,
- E_{zVonk} je energia, ktorú obvodový plášť odovzdá vzduchu v miestnosti,
- E_{zVnuta} je energia, ktorú vnútorné steny odovzdajú vzduchu v miestnosti,
- E_{vetr} je energia, ktorú vzduch v miestnosti získa vďaka vetraniu,
- E_{vykur} je energia, ktorú vzduch získa vďaka vykurovaniu a

- E_{zExter} je energia, ktorú obvodový plášť získava z exteriéru.

$$\begin{aligned}
 E_{miest}(k+1) &= E_{miest}(k) + E_{zVonk}(k) + E_{zVnut}(k) + E_{vetr}(k) + E_{vykur}(k) \\
 E_{vonk}(k+1) &= E_{vonk}(k) - E_{zVonk}(k) + E_{zExter}(k) \\
 E_{vnut}(k+1) &= E_{vnut}(k) - E_{zVnut}(k)
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

$$t = \frac{E}{m \cdot c} = \frac{E}{C} \tag{3.8}$$

Jednotlivé rovnice podelíme príslušnou tepelnou kapacitou C a použitím (3.8) dostávame rovnice pre teploty hmôr, ktoré zastupujú.

$$\begin{aligned}
 \frac{E_{miest}(k+1)}{C_{miest}} &= \frac{E_{miest}(k)}{C_{miest}} + \frac{E_{zVonk}(k)}{C_{miest}} + \frac{E_{zVnut}(k)}{C_{miest}} + \frac{E_{vetr}(k)}{C_{miest}} + \frac{E_{vykur}(k)}{C_{miest}} \\
 \frac{E_{vonk}(k+1)}{C_{vonk}} &= \frac{E_{vonk}(k)}{C_{vonk}} - \frac{E_{zVonk}(k)}{C_{vonk}} + \frac{E_{zExter}(k)}{C_{vonk}} \\
 \frac{E_{vnut}(k+1)}{C_{vnut}} &= \frac{E_{vnut}(k)}{C_{vnut}} - \frac{E_{zVnut}(k)}{C_{vnut}}
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

Vzhľadom na to, že výmena vzduchu je konštantná a za hodinu sa vymení polovica objemu vzduchu, som teplo získané vetraním vyjadril ako

$$E_{vetr} = C_{miest} \cdot (t_{amb} - t_{miest}) \cdot 0.125. \tag{3.10}$$

Spojením (3.9), (3.10) a (2.12) som dostať

$$\begin{aligned}
 t_{miest}(k+1) &= t_{miest}(k) + \frac{h_1(t_{vonk}(k) - t_{miest}(k))}{C_{miest}} + \frac{h_2(t_{vnut}(k) - t_{miest}(k))}{C_{miest}} + \\
 &\quad \frac{(t_{amb}(k) - t_{miest}(k))}{8} + \frac{h_3(t_{vyk}(k) - t_{miest}(k))}{C_{miest}} \\
 t_{vonk}(k+1) &= t_{vonk}(k) - \frac{h_1(t_{vonk}(k) - t_{miest}(k))}{C_{vonk}} + \frac{h_4(t_{vonk}(k) - t_{amb}(k))}{C_{vonk}} \\
 t_{vnut}(k+1) &= t_{vnut}(k) - \frac{h_2(t_{vnut}(k) - t_{miest}(k))}{C_{vnut}}
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

$$t = \begin{bmatrix} t_{miest} \\ t_{vonk} \\ t_{vnut} \end{bmatrix}, U = \begin{bmatrix} t_{amb} \\ t_{vyk} \end{bmatrix} \tag{3.12}$$

Vektor stavov a vstupov som si určil ako (3.12), potom matice modelu budú:

$$A = \begin{bmatrix} 0.875 - \frac{h_1+h_2+h_3}{C_{miest}} & \frac{h_1}{C_{miest}} & \frac{h_2}{C_{miest}} \\ \frac{h_1}{C_{vonk}} & 1 - \frac{h_1-h_4}{C_{vonk}} & 0 \\ \frac{h_2}{C_{vnut}} & 0 & 1 - \frac{h_2}{C_{vnut}} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{8} & \frac{h_3}{C_{miest}} \\ -\frac{h_4}{C_{vonk}} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.13)$$

Model, ktorý slúži pre MPC regulátor má tieto stavové rovnice

$$\begin{aligned} t(k+1) &= A \cdot t(k) + B \cdot U(k) \\ y(k) &= C \cdot t(k) + D \cdot U(k) \end{aligned}, \quad (3.14)$$

ale na odhadovanie počiatočných stavov, ktoré MPC regulátor potrebuje pre výpočet som použil model so stavovou injekciou.

$$\begin{aligned} t(k+1) &= A \cdot t(k) + B \cdot U(k) + K \cdot e \\ y(k) &= C \cdot t(k) + D \cdot U(k) \end{aligned}, \quad (3.15)$$

Stavovú injekciu K som nechal določiť rovnakou metódou, ako model s tým rozdielom, že vtedy som minimalizoval kritérium

$$J = \sum_{i=1}^d (\hat{y}(i) - y(i))^2; \quad R, Q > 0, \quad (3.16)$$

kde d dĺžka identifikačných dát, za podmienky, že platí určitý tvar matíc A, B, C, D a

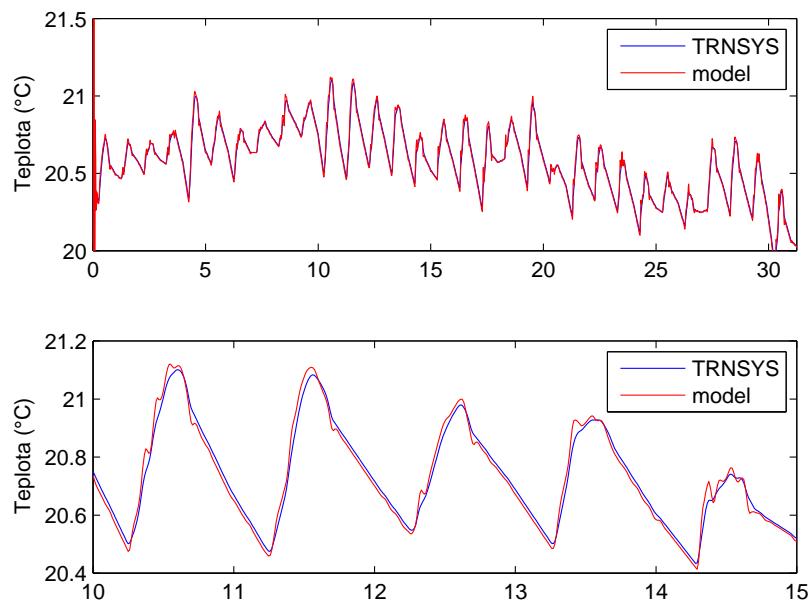
$$K = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3.17)$$

Tentokrát som podmienky pozmenil na

$$A = A_{odhadnute}, \quad B = B_{odhadnute}, \quad C = C_{odhadnute}, \quad D = D_{odhadnute}. \quad (3.18)$$

3.2.3.2 Validácia

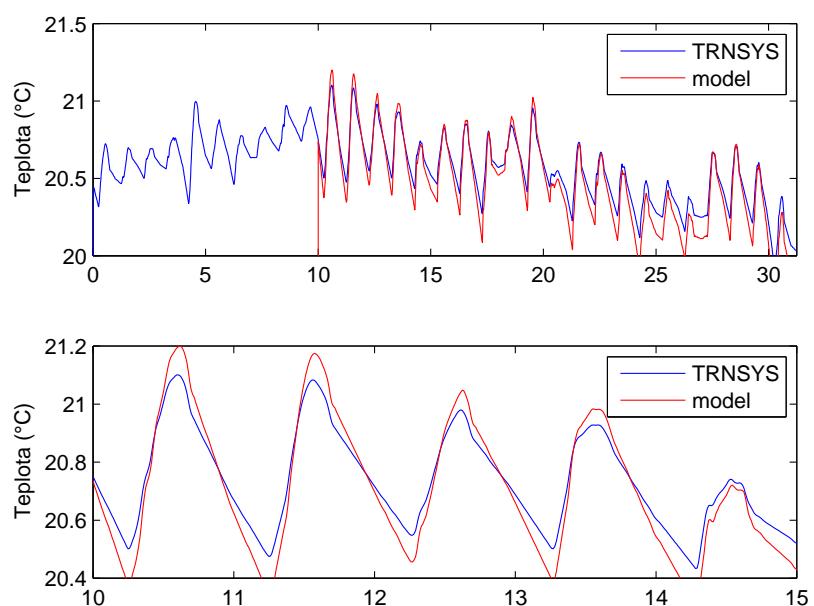
Model som overil na pokuse, kedy teplota vykurovacej vody bola po celú dobu konštantná a to 50°C . Vstupom do budovy bolo počasie rovnako ako pri simuláciach sezóny. Na



Obr. 3.4: Porovnanie modelu so stavovou injekciou a TRNSYS-u

obrázku 3.4 vidíme porovnanie reálneho priebehu teploty v referenčnej miestnosti a modelovaného výstupu za prvých 30 dní vykurovacej sezóny. Počiatočné podmienky boli stanovené tak, že známa bola iba teplota v miestnosti, ďalšie dva stavy boli neznáme, $t_{vnok0} = t_{vnuto} = 0$. Preto výrazný zákmit na začiatku.

Následne som v desiaty deň využil modelom vypočítané vnútorné stavy ako počiatočné stavy pre model, ktorý až do konca tohto pokusu bežal bez stavovej injekcie. Model sice chovanie systému nekopíruje dokonale, ale z obrázku 3.5 vidíme, že dynamiku systému vystihuje pomerne dobre a ani po dvasiatich dňoch sa príliš nelíši od reálnej hodnoty. Model mi teda vyhovuje, keďže ho budem bez injekcie používať iba pre časový horizont $\frac{3}{4}$ dňa (72 vzoriek).



Obr. 3.5: Porovnanie modelu bez stavovej injekcie a TRNSYS-u

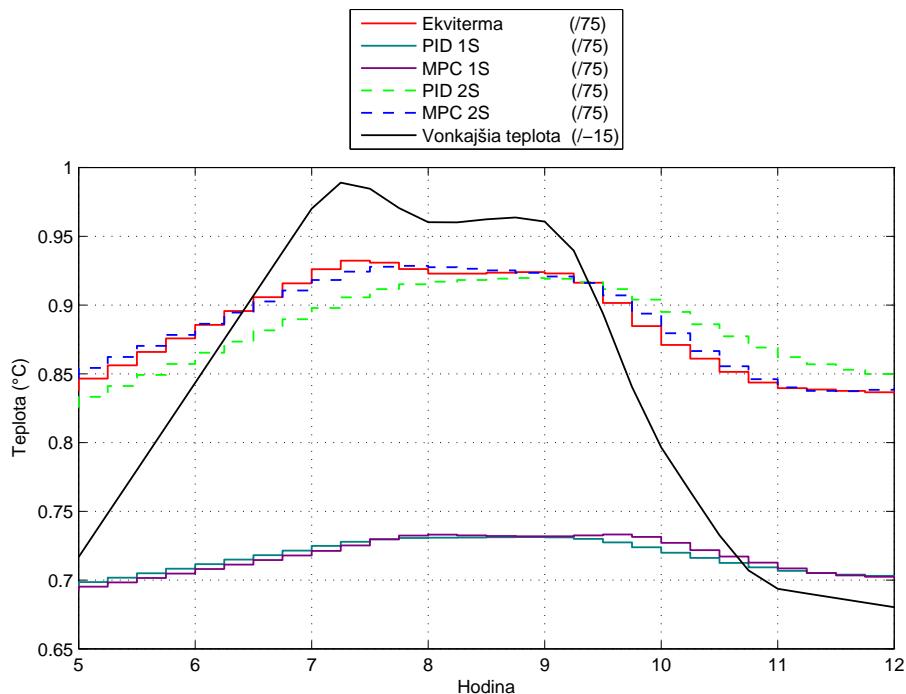
Kapitola 4

Výsledky

4.1 Konštantný režim

4.1.1 Zhodnotenie

Hodnota referencie sa počas simulácie nemení a po celú dobu je $r = 20^\circ\text{C}$. Hoci sa nejedná o klasický prípad vykurovania, jeho výsledky môžu byť zaujímavé hlavne v porovnaní s druhou variantou 4.2. Ako som už spomenul na konci sekcie 3.1.2 v porovnaní s praxou, kde sa okrem riadenia teploty vykurovacej vody často používajú aj iné regulačné prvky, napríklad termostatické hlavice, a nemalý vplyv má aj prirodzená samoregulácia zabezpečená termohydraulickými vlastnosťami sústavy. Ako referenčné som zvolil severné miestnosti na prvom a druhom poschodí, ktoré nie sú ovplyvnené solárnymi tepelnými ziskami. Považujem ich za najchladnejšie miestnosti aj z dôvodu, že susedia s nevykurovaným schodiskom. Na hodnotenie komfortu v miestnostiach som použil kritérium hodinostupňov, ale do úvahy beriem iba tie záporné (v miestnosti je zima). Stavu, že je príliš teplo je možné zabrániť napríklad spomínanými hlavicami. V prípade, že by napriek tomu tento stav nastal je vždy možné vyvetrať.



Obr. 4.1: Porovnanie normovaných akčných zásahov a vonkajšej teploty

Z grafov zobrazujúcich priebehy teplôt v miestnostiach (obrázky 4.2, 4.4 a 4.6) vidíme, že teplota v južných miestnostiach má mnoho špičiek, ktoré odpovedajú práve solárnym ziskom. Miestnosť 3SV je vo všetkých prípadoch prekúrená. To znamená, že nastavenie výkonov podľa pokusu zo sekcie 3.2.1, nebolo ideálne ani po úprave, ktorú som vykonal. Je zaujímavé, že priebehy získané PID a MPC regulátorom sú takmer rovnaké, čomu odpovedajú aj údaje z tabuľky 4.1. To platí aj pri použití referenčnej miestnosti 2S ako vidíme v tabuľke 4.2. Pri porovnaní akčných zásahov zo dňa 13.2. na obrázku 4.1 vidíme, že pri použití referenčnej miestnosti 2S sú akčné zásahy PID a MPC veľmi podobné zásahom ekvitermej regulácie. Tomu zodpovedá aj rozloženie teplôt počas roka na obrázku 4.9. Pri použití referenčnej miestnosti 1S majú akčné zásahy regulátorov PID a MPC menšiu amplitúdu, ale sú aj časovo posunuté v porovnaní so zásahmi ekvitermy.

Na obrázku 4.10 vidíme, že spotreby jednotlivých stratégii sú takmer rovnaké. Po porovnaní obrázkov 4.8 a 4.9 vidíme, že regulátory zabezpečia správnu teplotu v referenčnej miestnosti, čím dosiahnu prijateľný komfort pre celé poschodie, na ktorom sa miestnosť nachádza. Vo variante pre 1S je druhé poschodie značne nedokúrené a horné je nedokúrené mierne. Zaujímavé vo variante 2S je, že hoci je druhé a tretie poschodie dobre vykúrené, na prvom poschode býva chladno. Z toho vyplýva, že jednotlivé poschodia sa chovajú odlišne a hoci obe varianty do domu dodajú rovnakú energiu, veľmi záleží na

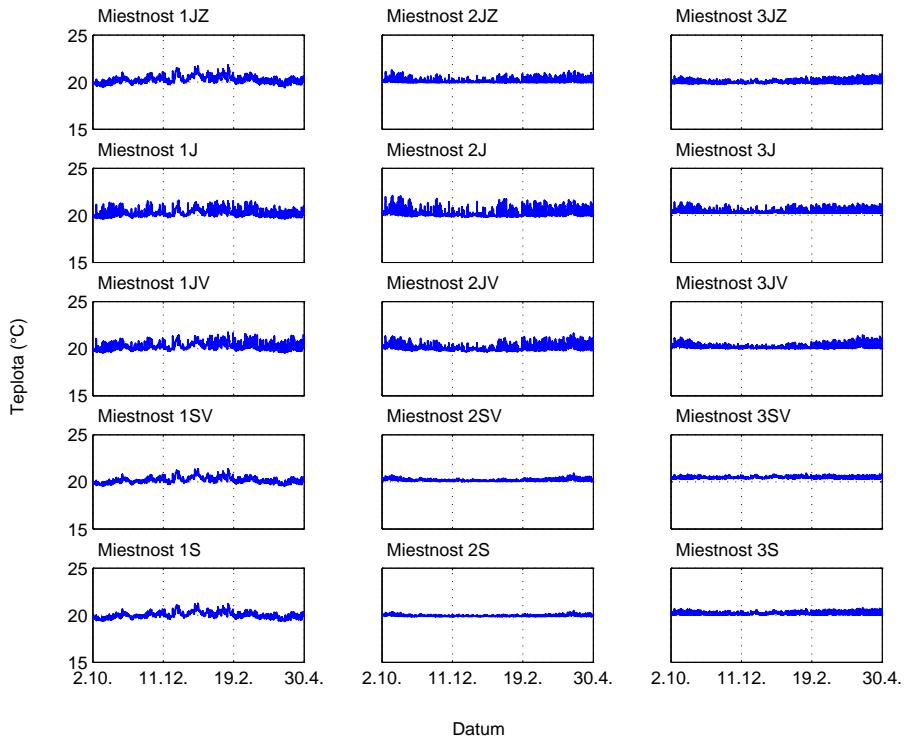
spôsobe akým sa dávkuje.

Najvhodnejšou variantou bez potreby úpravy inštalácie vykurovacej sústavy pre takúto budovu je podľa môjho názoru ekvitermná regulácia, ktorej výhodou je hlavne jednoduchosť. Zároveň zabezpečuje priateľné rozloženie teplôt vo všetkých miestnostiach. Pre dosiahnutie lepšieho komfortu by som však rozdelil budovu na dve časti:

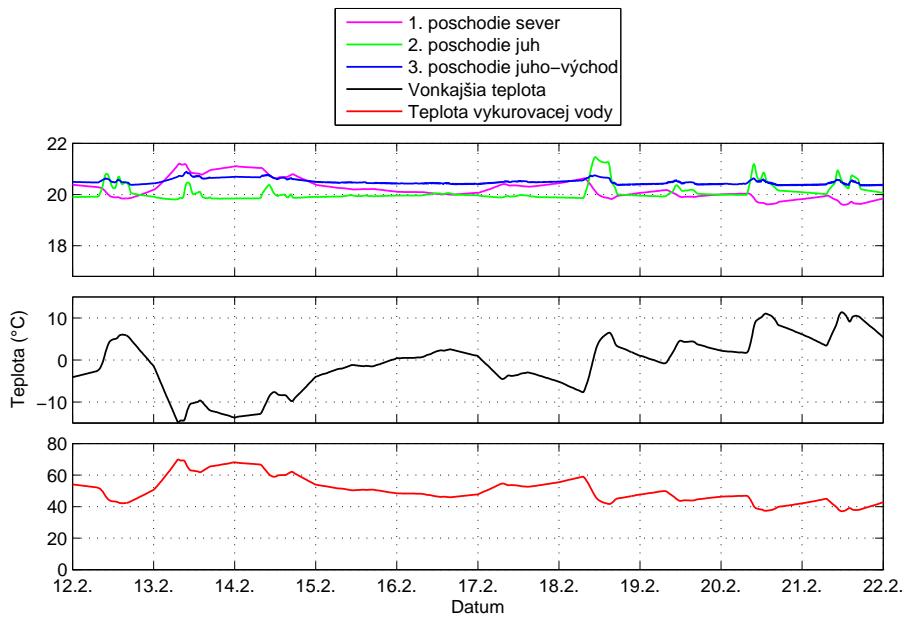
1. časť - 1. poschodie (referenčná miestnosť 1S),
2. časť - 2. a 3. poschodie (referenčná miestnosť 2S).

Každej z častí by bola dodávaná teplota vody podľa jej regulátora. Nižšiu z teplôt je možné dosiahnuť napríklad použitím trojcestného ventilu. Rozdiel vo výsledkoch MPC a PID regulátora bol minimálny, takže by som opäť použil jednoduchšiu možnosť, ktorou je PID.

4.1.1.1 Ekviterma

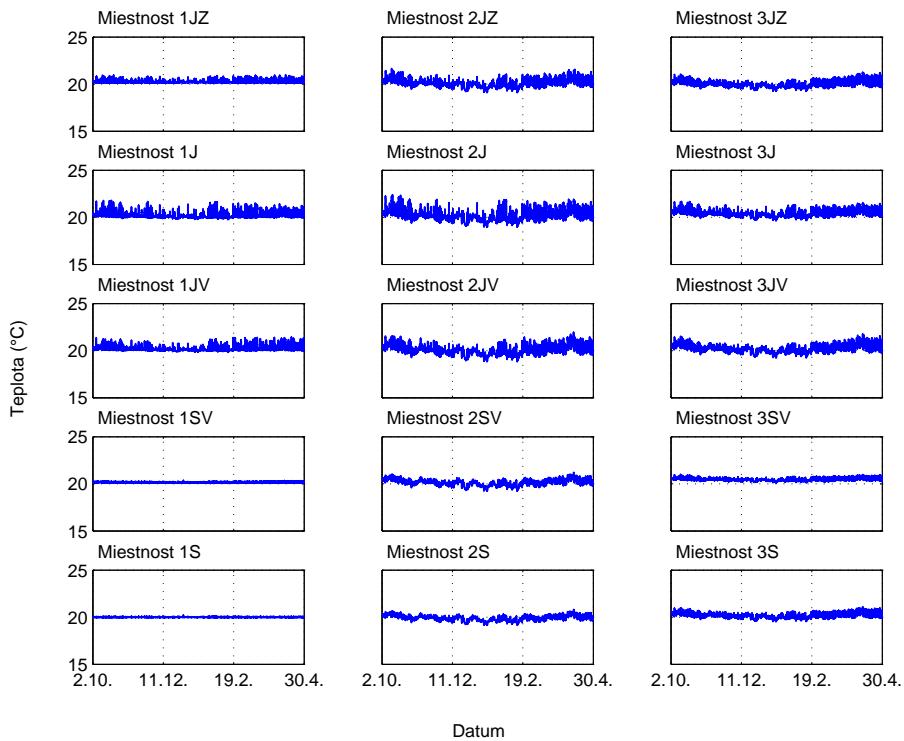


Obr. 4.2: Priebehy teplôt v miestnostiach počas vykurovacej sezóny

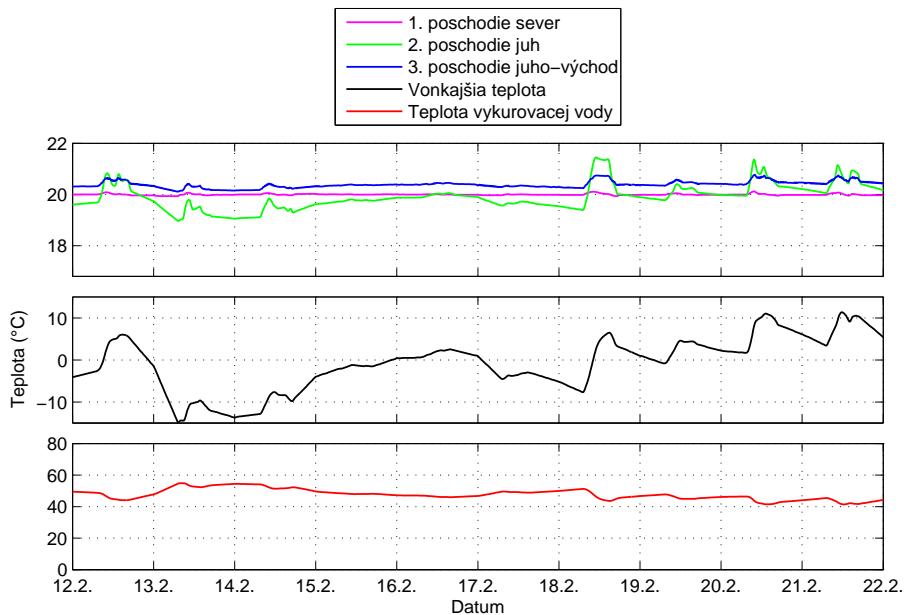


Obr. 4.3: Priebehy počas reprezentatívnych 10 dní

4.1.1.2 PID

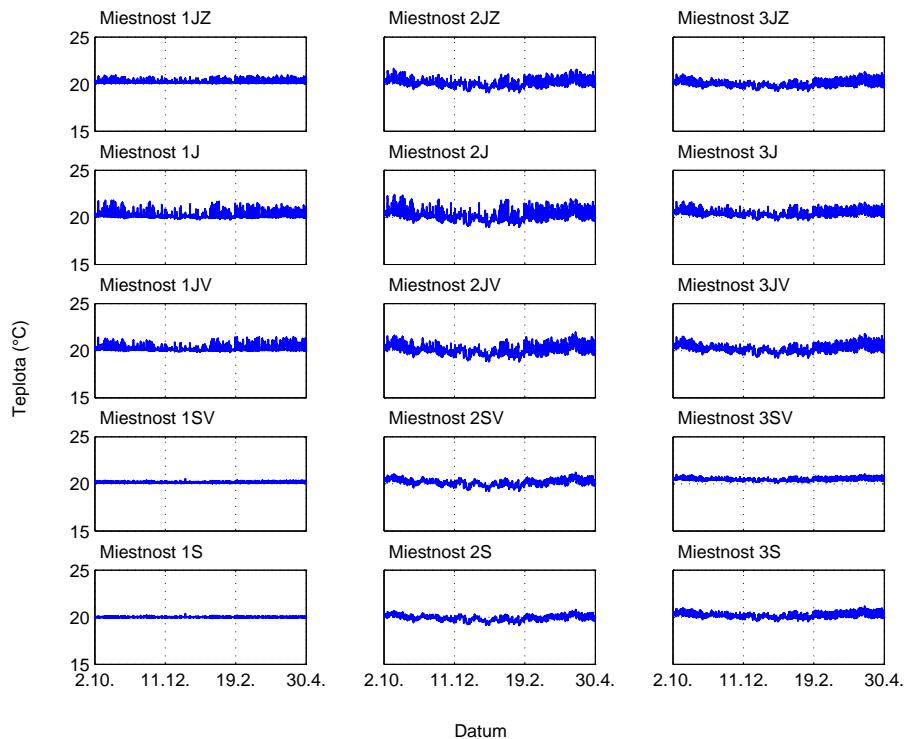


Obr. 4.4: Priebehy teplôt v miestnostiach počas vykurovacej sezóny

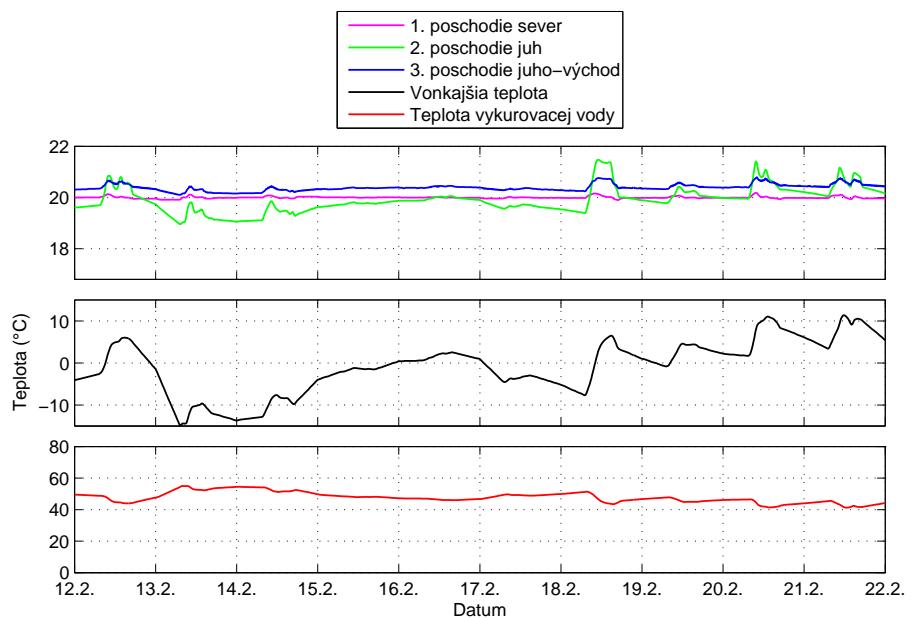


Obr. 4.5: Priebehy počas reprezentatívnych 10 dní

4.1.1.3 MPC

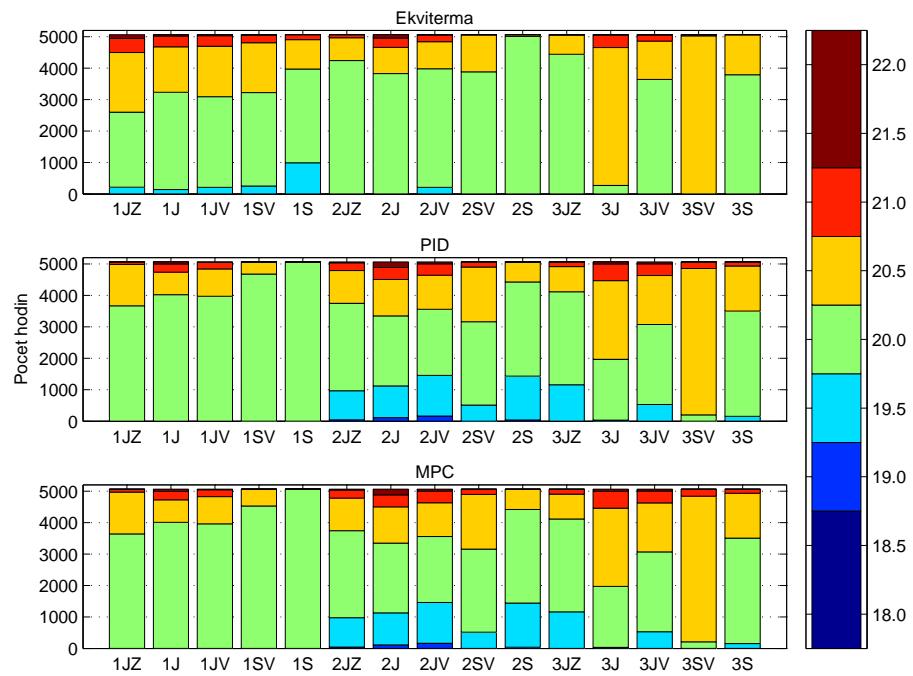


Obr. 4.6: Priebehy teplôt v miestnostiach počas vykurovacej sezóny



Obr. 4.7: Priebehy počas reprezentatívnych 10 dní

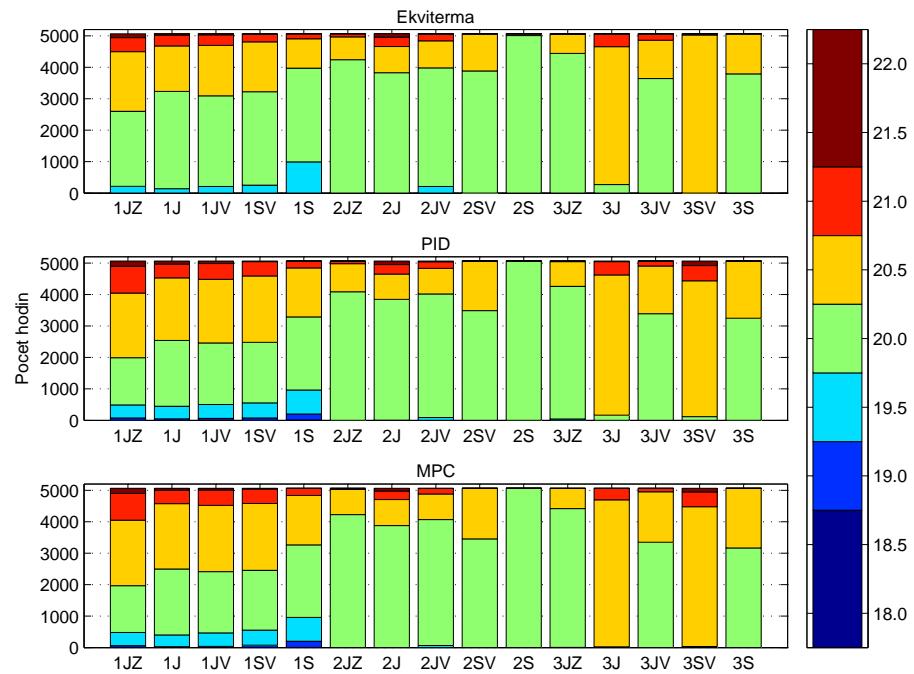
4.1.2 Vyhodnotenie tepelného komfortu



Obr. 4.8: Rozloženie teplôt v miestnostiach
(referenčná miestnosť 1S)

Tabuľka 4.1: Počet záporných hodino-stupňov pre jednotlivé stratégie
(referenčná miestnosť 1S)

Stratégia	1. poschodie	2. poschodie	3. poschodie	Spolu	Spotreba (MWh)
Ekviterma	912.1	112.0	7.0	1031.1	43.17
PID	15.0	2932.8	947.0	3894.8	42.50
MPC	13.0	2951.4	953.4	3917.4	42.51

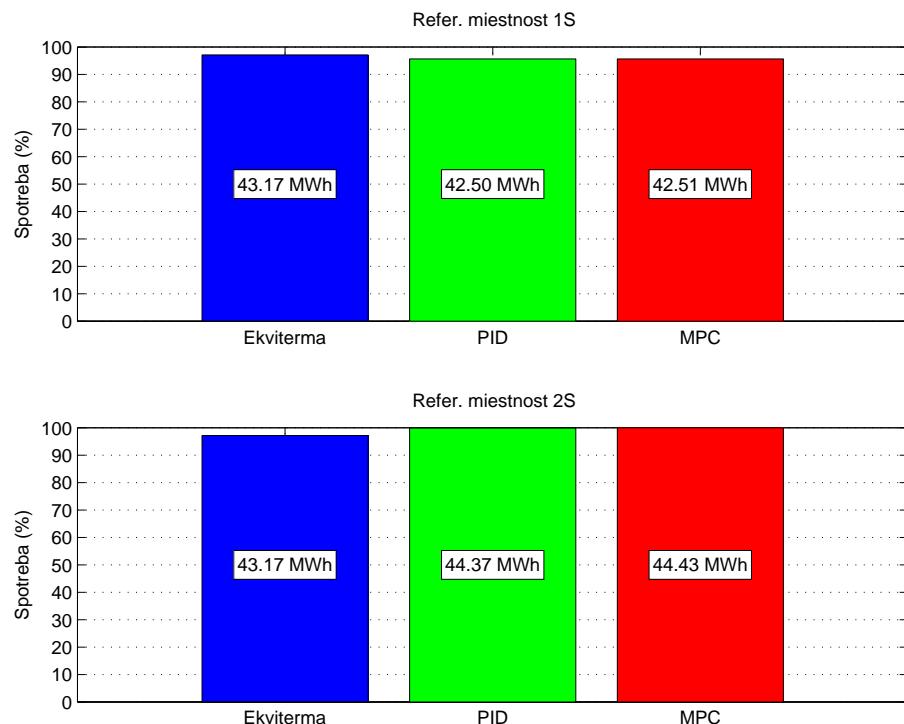


Obr. 4.9: Rozloženie teplôt v miestnostiach
(referenčná miestnosť 2S)

Tabuľka 4.2: Počet záporných hodino-stupňov pre jednotlivé stratégie
(referenčná miestnosť 2S)

Stratégia	1. poschodie	2. poschodie	3. poschodie	Spolu	Spotreba (MWh)
Ekviterma	912.1	112.0	7.0	1031.1	43.17
PID	1733.0	63.6	34.9	1831.5	44.37
MPC	1654.1	43.4	12.0	1709.5	44.43

4.1.3 Spotreba



Obr. 4.10: Spotreby za vykurovaciu sezónu

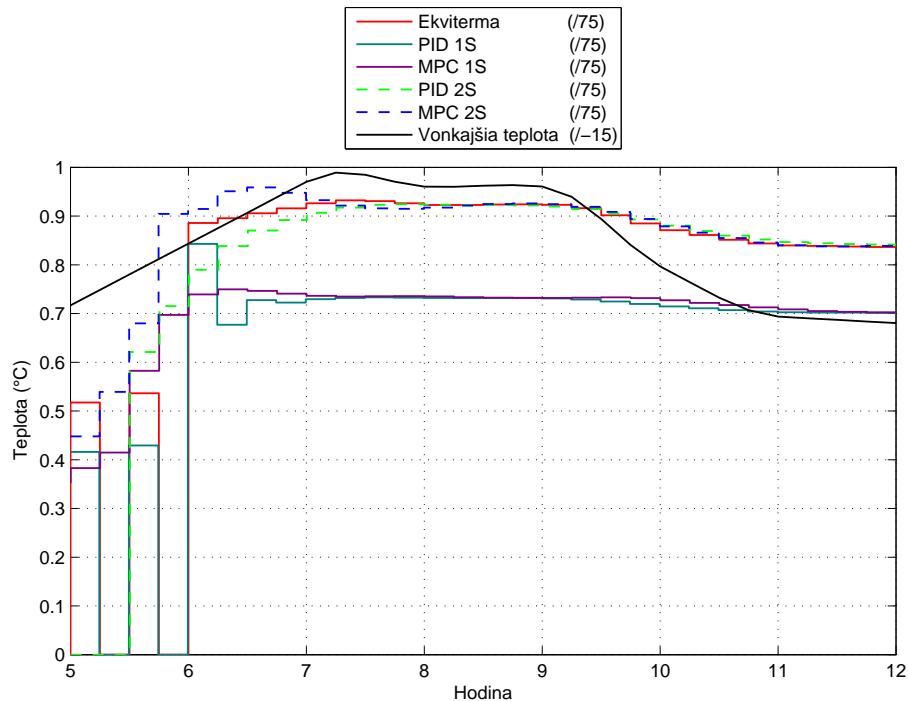
4.2 Režim s útlmom

4.2.1 Zhodnotenie

Referencia v tomto prípade bola v každý deň rovnaká a to $r = 20^\circ\text{C}$ pre časový úsek 6:00-20:00. V ostatnom čase 20:00-06:00 je referencia $r = 17^\circ\text{C}$. Toto je celkom častý prípad, ktorý sa využíva v rodinných domoch. Predpoklady pre hodnotie sú rovnaké ako v sekcií 4.1.1.

Grafy na obrázkoch 4.12, 4.14 a 4.16 nám tentokrát veľa informácie nepodajú, keďže útlm grafy „zašumí“. Zaujímavejšie sú pre nás priblížené priebehy z obrázkov 4.13, 4.15 a 4.17, kde vidíme, že teplota v miestnostiach na jednotlivých poschodiach klesá rôznou rýchlosťou. Na obrázku 4.11 pozorujeme, opäť podobnosť priebehov výstupov jednotlivých regulátorov, podobne ako tomu bolo v sekcií 4.1.1. K podobnosti, ale dochádza až po hodine od prechodu do komfortného režimu.

Spotreby jednotlivých stratégii zobrazené na obrázku 4.20 sú opäť takmer totožné.

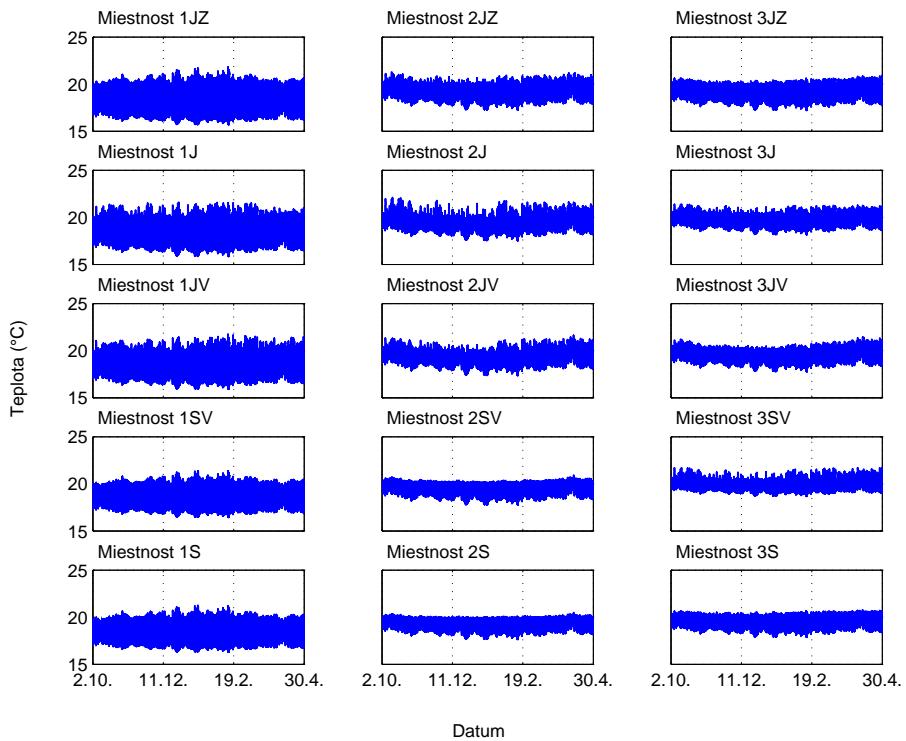


Obr. 4.11: Porovnanie normovaných akčných zásahov a vonkajšej teploty

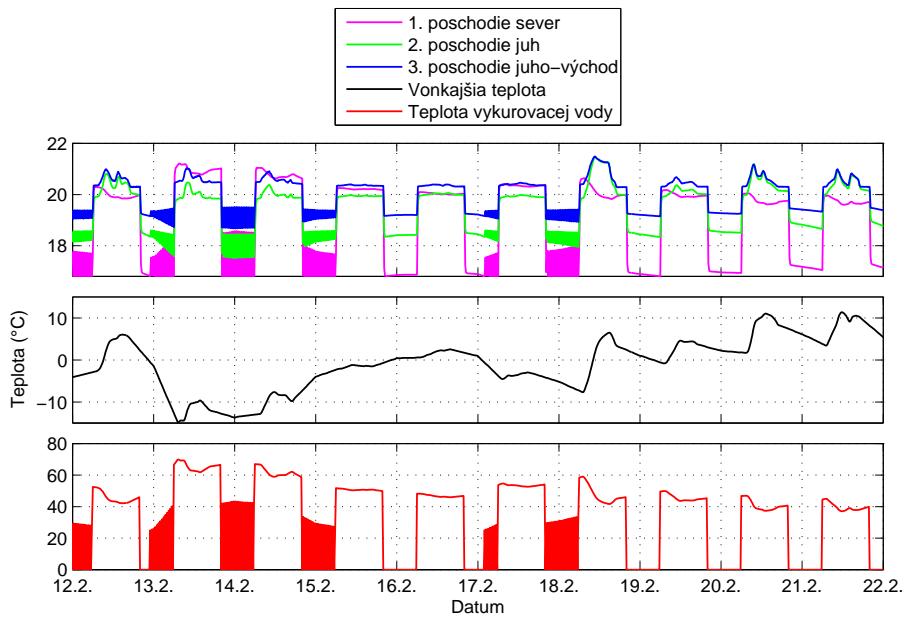
Porovnaním obrázkov 4.18 a 4.19 opäť vidíme, že regulátory zabezpečia správnu teplotu v referenčnej miestnosti, ale ekviterma a PID regulátor majú u každej miestnosti určitý počet hodín, kedy je v nej chladno. Na rozdiel od nich MPC regulátor zabezpečuje, že v miestnosti bude požadovaná teplota hned' po začatí komfortného režimu, to vysvetľuje jeho vyššiu spotrebu, ktorá nie je chybou, ale cenou, ktorú je nutné vynaložiť pre lepší komfort. Zvyšné dva regulátory akoby každý deň vykurovali o pol hodinu menej. Zaujímavé je, že PID regulátor pre variantu 2S dosiahol horšiu kvalitu komfortu, podľa tabuľky 4.4, ako ekviterma.

Najvhodnejšou variantou bez potreby úpravy inštalácie vykurovacej sústavy by bola opäť ekvitermná regulácia, ktorú môžeme poupraviť predĺžením referencie ráno do ($t_{komfON} - 30 \text{ min}$), aby sme mali komfortnú teplotu už v čase t_{komfON} . V prípade, že budovu rozdelíme na dve zóny tak ako v 4.1.1, je jednoznačne výhodnejšie použitie MPC regulátora, ktorý zabezpečil pre referenčné poschodia bezkonkurenčne najlepší tepelný komfort.

4.2.1.1 Ekviterma

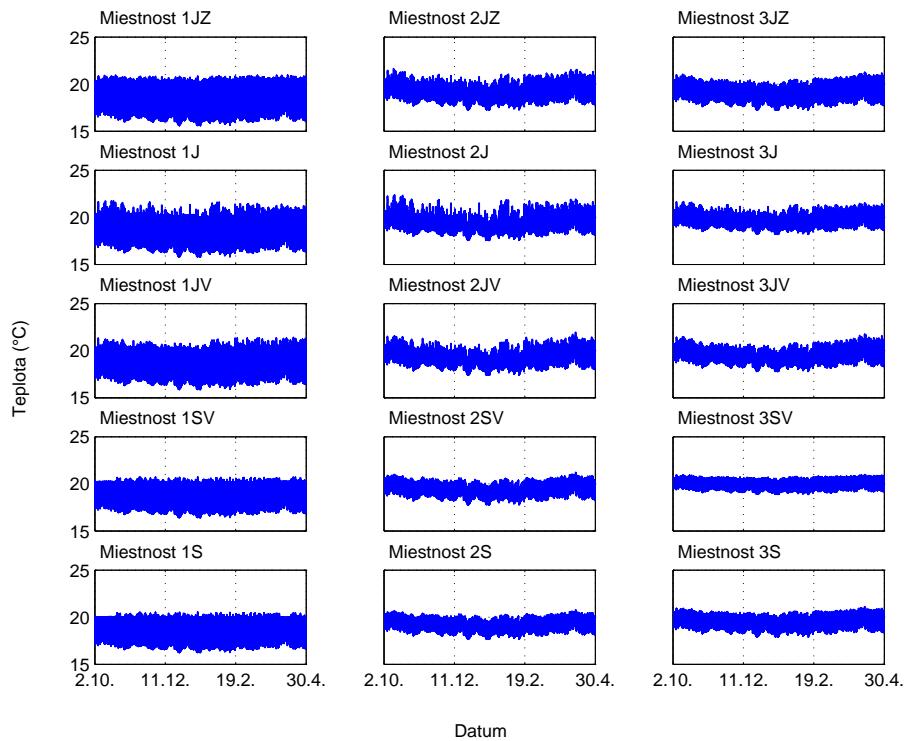


Obr. 4.12: Priebehy teplôt v miestnostiach počas vykurovacej sezóny

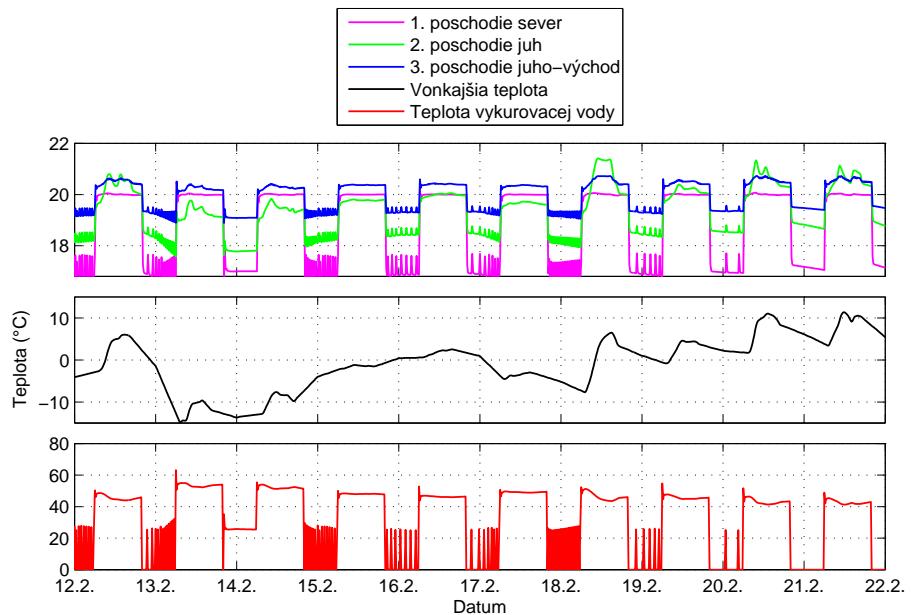


Obr. 4.13: Priebehy počas reprezentatívnych 10 dní

4.2.1.2 PID

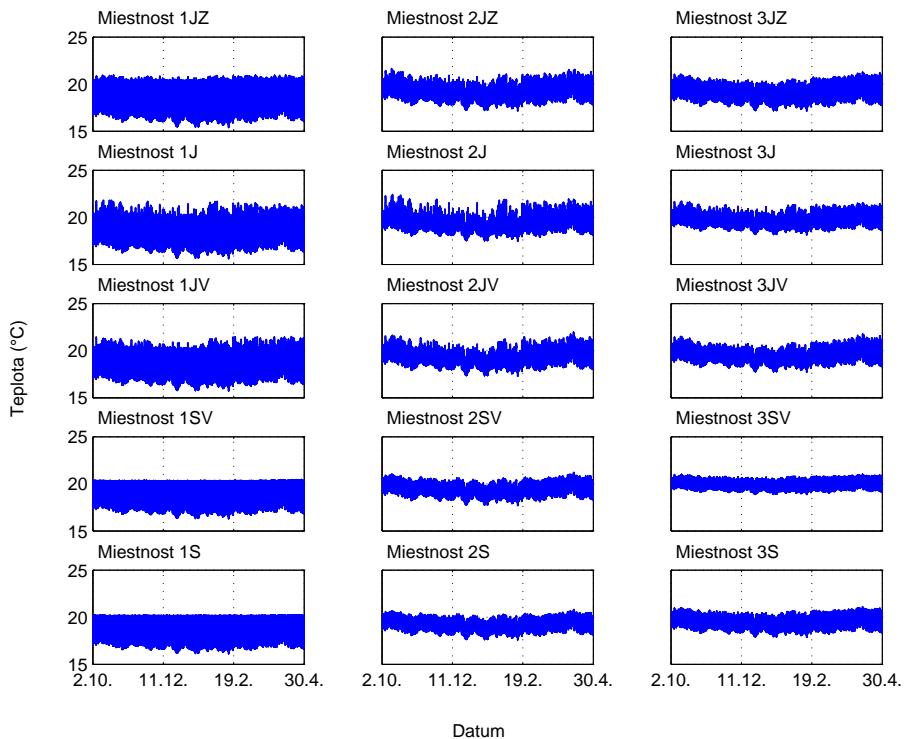


Obr. 4.14: Priebehy teplôt v miestnostiach počas vykurovacej sezóny

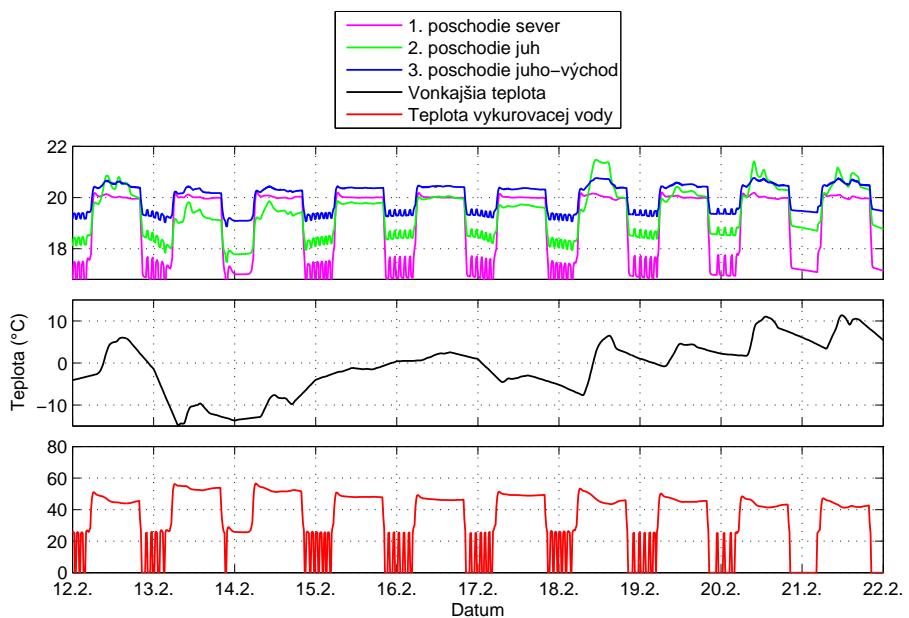


Obr. 4.15: Priebehy počas reprezentatívnych 10 dní

4.2.1.3 MPC

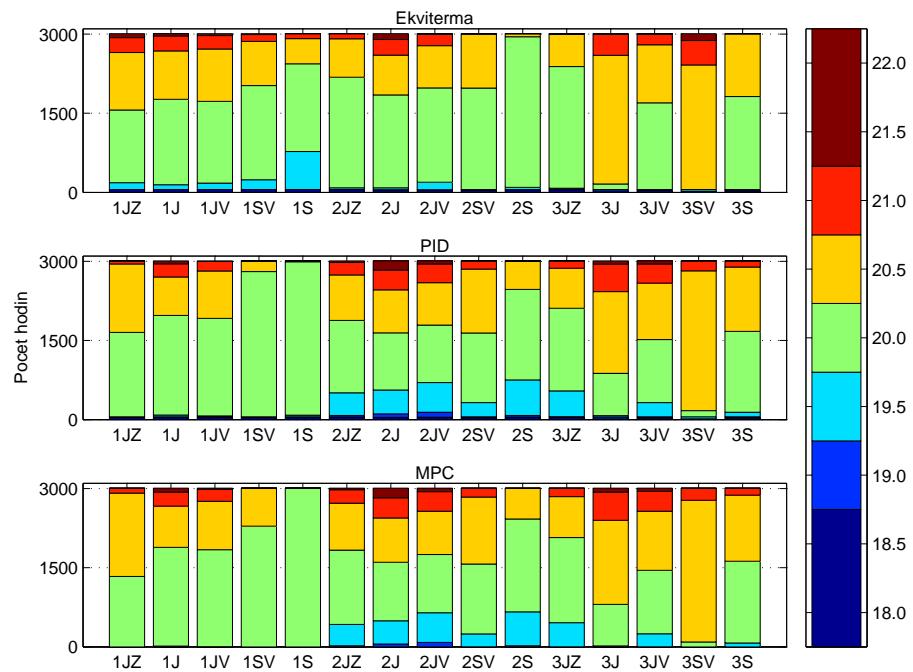


Obr. 4.16: Priebehy teplôt v miestnostiach počas vykurovacej sezóny



Obr. 4.17: Priebehy počas reprezentatívnych 10 dní

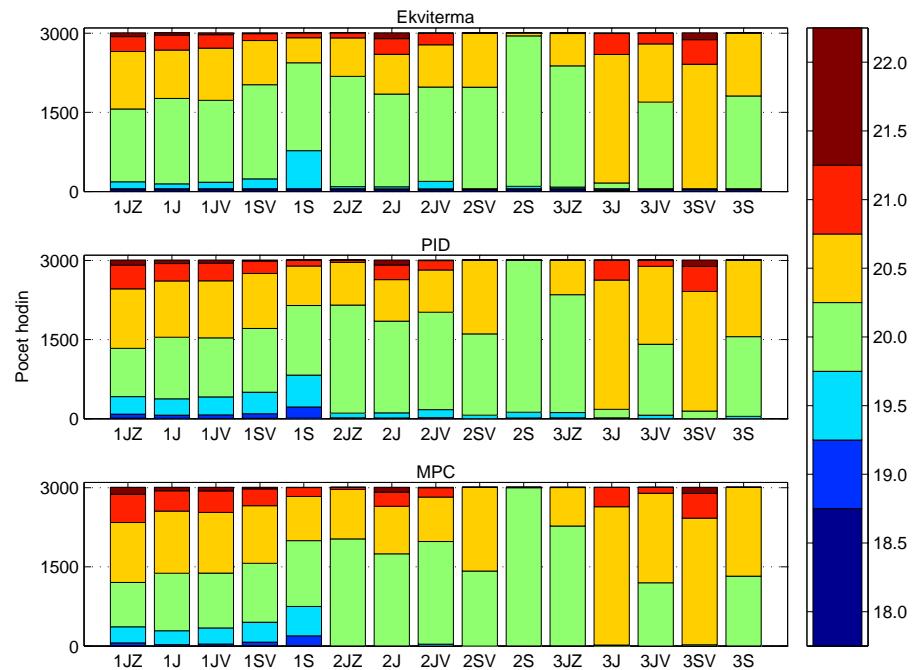
4.2.2 Vyhodnotenie tepelného komfortu



Obr. 4.18: Rozloženie teplôt v miestnostiach
(referenčná miestnosť 1S)

Tabuľka 4.3: Počet záporných hodino-stupňov pre jednotlivé stratégie
(referenčná miestnosť 1S)

Stratégia	1. poschodie	2. poschodie	3. poschodie	Spolu	Spotreba (MWh)
Ekviterma	636.5	170.0	138.3	944.8	25.76
PID	53.7	1437.1	551.6	2042.4	25.31
MPC	20.5	1336.5	404.4	1761.4	27.35

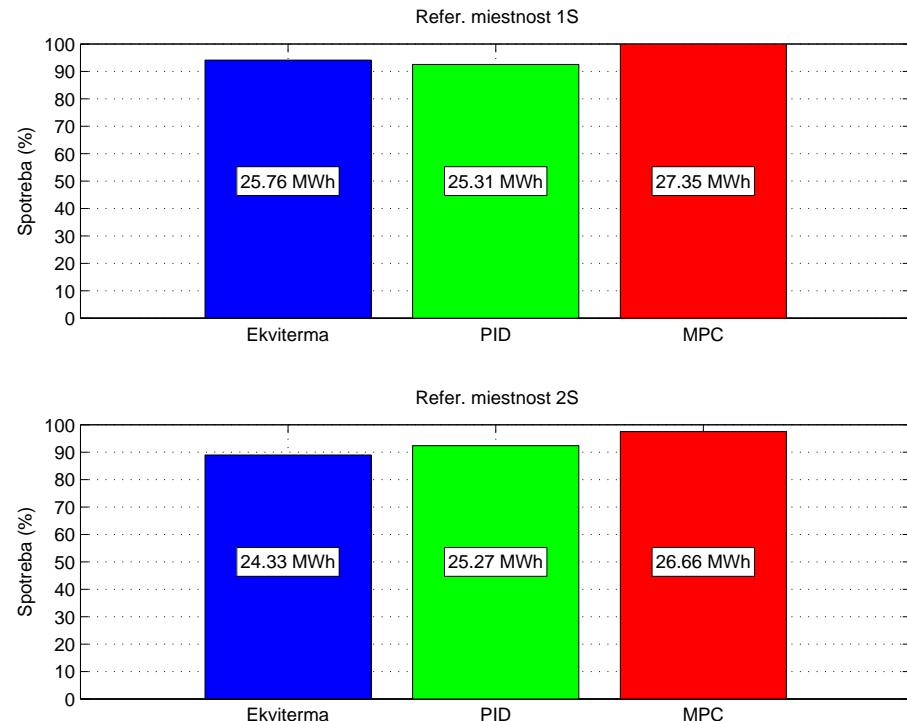


Obr. 4.19: Rozloženie teplôt v miestnostiach
(referenčná miestnosť 2S)

Tabuľka 4.4: Počet záporných hodino-stupňov pre jednotlivé stratégie
(referenčná miestnosť 2S)

Stratégia	1. poschodie	2. poschodie	3. poschodie	Spolu	Spotreba (MWh)
Ekviterma	636.5	171.4	120.1	928	24.33
PID	1548.6	337.7	142.0	2028.3	25.27
MPC	1314.6	26.4	8.9	1349.9	26.66

4.2.3 Spotreba



Obr. 4.20: Spotreby za vykurovaciu sezónu

Kapitola 5

Záver

Táto diplomová práca porovnáva kvalitu a cenu regulácie vykurovania na podrobnom simulačnom modeli domu, ktorého popis dokumentuje. Poukazuje na veľký význam správnej voľby referenčnej miestnosti. Pri vyhodnocovaní výsledkov sa ukázalo, že hoci sú prvé a druhé poschodie stavebne takmer rovnaké, vplyv nevykurovaných priestorov v prízemí na dynamiku prvého poschodia je značný. Rozdiel chovania týchto priestorov bol tak významný, že pri použití jednej referenčnej miestnosti na niektorom z poschodí bolo dané poschodie vykúrené správne, ale zvyšok domu už nemal až tak dobré výsledky. Spotreby porovnávaných regulátorov sa ukázali byť veľmi podobné. Najlepšie výsledky dosahovala ekviterma, ktorá vykazovala najvyššie hodnoty tepelného komfortu z pohľadu celej budovy. Ak by sme porovnávali iba referenčné poschodie, PID a MPC regulátor dosiahli pri konštantnom režime takmer rovnaký výsledok, ktorý bol lepší než u ekvitermy. Pri využití útlmu sa prejavila výhoda MPC regulátora, ktorý dokázal zakúriť už vopred. PID regulátor dosiahol v tomto režime horší výsledok dokonca aj pre referenčné poschodie než ekviterma.

Ako riešenie problému s rozdielnou tepelnou dynamikou poschodí, ktorý postihuje väčšinu rodinných domov sa naskýta samostatná regulácia jednotlivých poschodí príslušnym akčným zásahom.

Literatúra

ČSN 73 0540 (1965), Praha: Vydavatelství ÚNM.

ČSN 73 0540 (1978), Praha: Vydavatelství ÚNM.

ČSN 73 0540-2 (1994), Praha: Český normalizační institut.

ČSN 73 0540-2 (2007), Praha: Český normalizační institut.

ČSN 73 0540-2 (2011), Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN 73 0540-3 (2005), Praha: Český normalizační institut.

ČSN EN 15251 (2011), Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ASTROM, K. MURRAY, R. (2008), *Feedback Systems*, Princeton: Princeton University Press. ISBN 978-0-691-13576-2.

BARTÁK, M. (2010), *Úvod do přenosových jevů pro inteligentní budovy*, Praha

BAŠTA, J. (2001), *Otopné plochy*, Praha: Vydavatelství ČVUT. ISBN 80-01-02365-6.

CAMACHO, E. F. a BORDONS, C. (1999), *Model Predictive Control*, Londýn: Springer. ISBN 3-540-76241-8.

FICKER, T. (2004), *Příručka stavební tepelné techniky, akustiky a denního osvětlení*, Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o. ISBN 80-214-2670-5.

KULHÁNEK, F. a TYWONIAK, J. (2000), *Stavební fyzika 20: stavební tepelná technika*, Praha: ČVUT. ISBN 80-01-02219-6.

ŠÁLA, J. KEIM, L. SVOBODA, Z. TYWONIAK, J. a NOVÁK, J. (2008), *Tepelná ochrana budov*, Praha: Informační centrum ČKAIT. ISBN 978-80-87093-30-6.

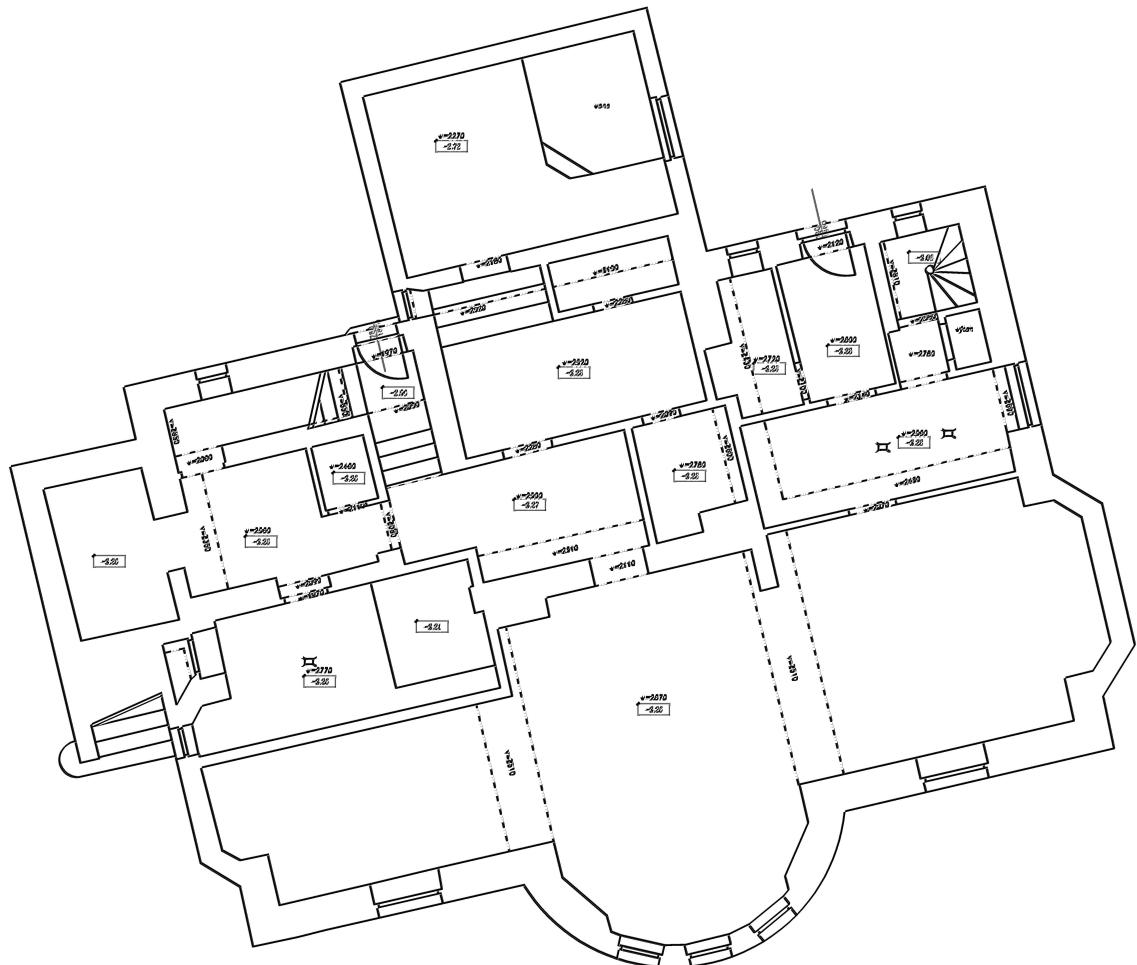
PETRÁŠ, D. LULKOVÍČOVÁ, O. BAŠTA, J. TAKÁCS, J. KABELE, K. a KIRŠ, J. (2005), *Vytápění rodinných a bytových domů*, Bratislava: Jaga group, s.r.o. ISBN 80-8076-020-9.

RÁŽ, J. V. (3.5.2010), *Optimální řízení tepelného výkonu s úsporami tepla z tepelných zisků*, www.tzb-info.cz.

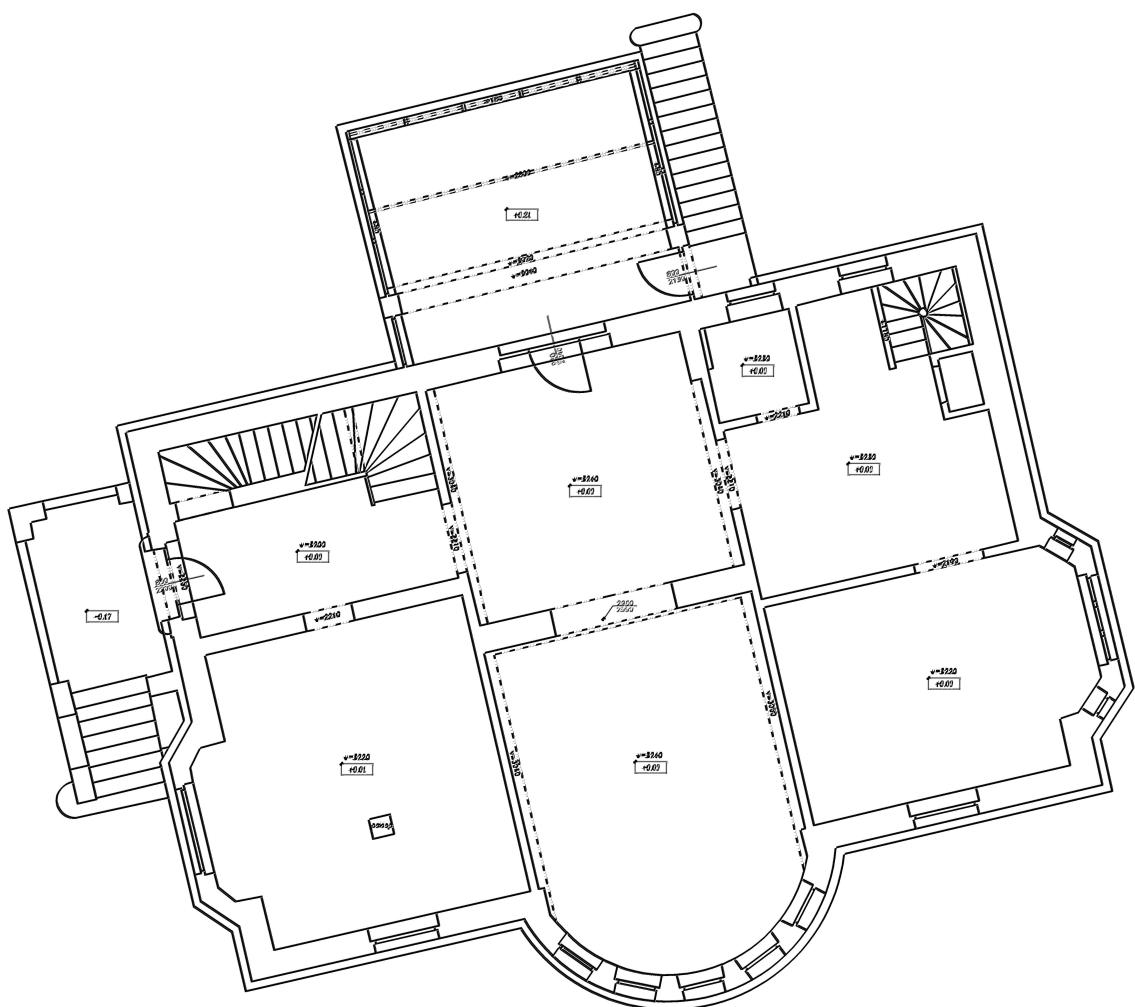
UNDERWOOD, C. P. (1999), *HVAC Control Systems - Modelling, Analysis and Design*, Londýn: E & FN SPON. ISBN 0-419-20980-8.

Príloha A

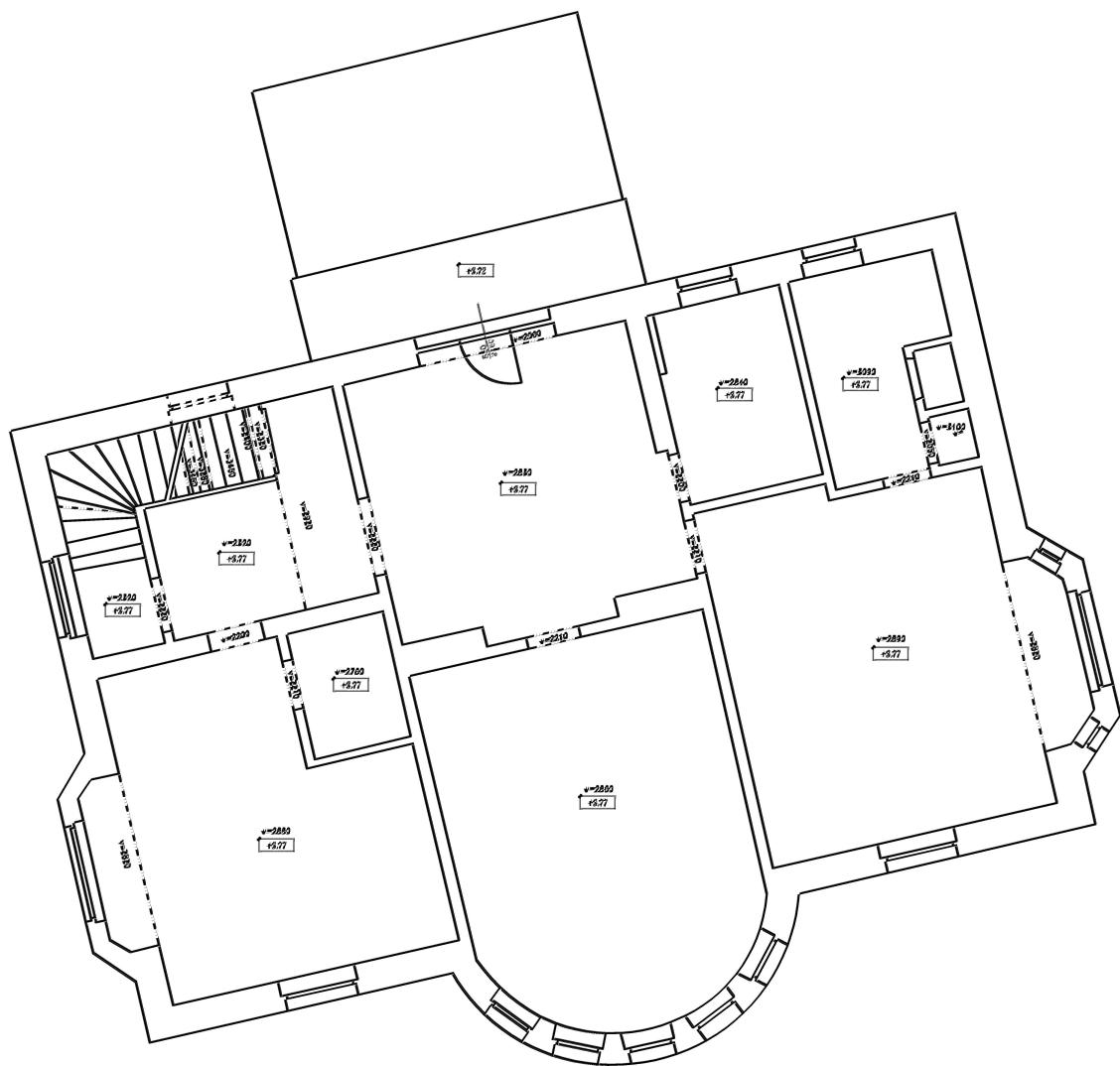
Pôdorysy predlohy modelu



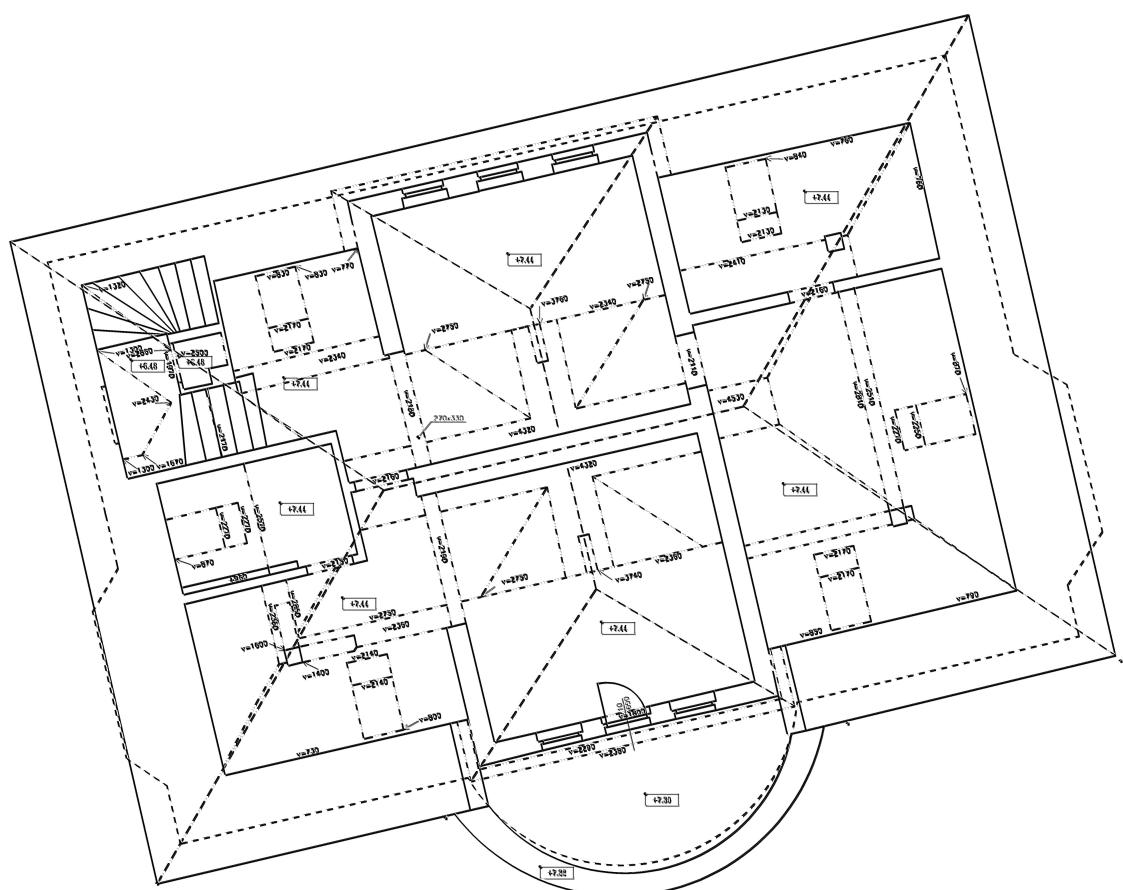
Obr. A.1: Prízemie



Obr. A.2: 1. poschodie



Obr. A.3: 2. poschodie



Obr. A.4: 3. poschodie

Príloha B

Obsah priloženého DVD

K tejto práci je priložené DVD, ktoré obsahuje zdrojové kódy, výsledky simulácií a si-mulačný model.

- Data : Nachádzajú sa tu údaje zo simulácií
- Grafy : Obsahuje vlastné grafy, použité v diplomovej práci.
- Matlab : Obsahuje zdrojové kódy potrebné pre spúšťanie simulácií
- TRNSYS : Obsahuje simulačné projekty jednotlivých metód a model budovy.