

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKÉJ A POTRAVINÁRSKEJ
TECHNOLÓGIE**

EVIDENČNÉ ČÍSLO: FCHPT-123283-43982

**PREDIKTÍVNE RIADENIE INTELIGENTNÝCH BUDOV
BAKALÁRSKA PRÁCA**

2017

Tomáš Tkáč

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKÉJ A POTRAVINÁRSKEJ
TECHNOLÓGIE**

Evidenčné číslo: FCHPT-123283-43982

**PREDIKTÍVNE RIADENIE INTELIGENTNÝCH BUDOV
BAKALÁRSKA PRÁCA**

Študijný program: automatizácia, informatizácia a manažment v chémii a potravinárstve

Študijný odbor: 5.2.14. automatizácia, 5.2.52. priemyselné inžinierstvo

Školiace pracovisko: Ústav informatizácie, automatizácie a matematiky

Vedúci záverečnej práce: doc. Ing. Michal Kvasnica, PhD.

Konzultant: Ing. Ján Drgoňa

Bratislava 2017

Tomáš Tkáč



ZADANIE BAKALÁRSKEJ PRÁCE

Študent: **Tomáš Tkáč**
ID študenta: 43982
Študijný program: automatizácia, informatizácia a manažment v chémii a potravinárstve
Kombinácia študijných odborov: 5.2.14. automatizácia, 5.2.52. priemyselné inžinierstvo
Vedúci práce: doc. Ing. Michal Kvasnica, PhD.
Konzultant: Ing. Ján Drgoňa

Názov práce: **Prediktívne riadenie inteligentných budov**

Jazyk, v ktorom sa práca vypracuje: slovenský jazyk

Špecifikácia zadania:

Cieľom práce je navrhnúť prediktívny (MPC) regulátor, ktorý ovláda tepelné toky v budove tak, aby bola dosiahnutá požadovaná úroveň tepelného komfortu a zároveň bola minimalizovaná energia. Na konštrukciu regulátora sa použije princíp optimálneho riadenia na konečnom časovom horizonte, pričom sa optimálne akčné zásahy získajú riešením optimalizačného problému v každej perióde vzorkovania.

Úlohy:

1. Analyzovať dostupné matematické modely budov a vybrať ten najvhodnejší pre účely riadenia.
2. Navrhnúť a simulačne overiť MPC regulátor bez uvažovania predikcií o vývoji počasia.
3. Porovnať dosiahnuté výsledky s existujúcimi riešeniami (PID, LQR).
4. Simulačne overiť kvalitu riadenia.

Riešenie zadania práce od: 13. 02. 2017

Dátum odovzdania práce: 14. 05. 2017

Tomáš Tkáč

študent

prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
vedúci pracoviska

prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
garant študijného programu

Pod'akovanie

Rád by som sa poďakoval vedúcemu bakalárskej práce doc. Ing. Michalovi Kvasnicovi, PhD. za odovzdané vedomosti, kvalitnú a zaujímavú formu výučby a za jeho vedenie, rady a pripomienky počas písania tejto práce.

Zároveň chcem poďakovať konzultantovi Ing. Jánovi Drgoňovi za jeho nadšenie pre problematiku, trpezlivosť, rady a zmysel pre humor.

Abstrakt

Táto práca sa zameriava na základné princípy v oblasti automatizácie inteligentných budov. Jej cieľom je do navrhnutého matematického modelu miestnosti implementovať také spôsoby riadenia, ktoré budú spĺňať požiadavku tepelného komfortu v miestnosti a zároveň minimalizovať množstvo energie spotrebovanej na vykurovanie. Práca sa zaoberá návrhom viacerých typov regulátorov, pričom najvyspelejší prístup k riadeniu predstavuje prediktívny MPC regulátor. Dôležitou časťou je implementácia navrhnutých regulátorov v prostredí softvérového nástroja Matlab a ich simulačné overenie. Pri práci sa využívajú poznatky matematického modelovania, stavového opisu dynamického systému a teórie automatického riadenia. V závere práce sa nachádza podrobná analýza implementovaných prístupov k riadeniu, ich vzájomné porovnanie a vyhodnotenie kvality riadenia.

Kľúčové slová: prediktívne riadenie; MPC regulátor; inteligentná budova; matematický model

Abstract

This thesis focuses on the basic principles in the field of intelligent building automation. The aim of the thesis is to implement into the mathematical model of the room a way of control that will meet the thermal comfort requirement in the room while minimizing the amount of energy consumed for heating. The thesis deals with the design of several types of controllers, with the most advanced approach to control being the predictive MPC controller. An important part is the implementation of the designed controllers in the environment of the Matlab software tool and their simulative verification. The thesis uses the knowledge of mathematical modeling, state representation of the dynamic system and the theory of automatic control. At the end of the thesis there is a detailed analysis of implemented control approaches, their mutual comparison and evaluation of the control quality.

Keywords: predictive control; MPC controller; intelligent building; mathematical model

Obsah

Zoznam skratiek a termínov	13
Úvod.....	14
1 Matematický model	15
1.1 SISO a MIMO systémy	16
1.1.1 SISO	16
1.1.2 MIMO	16
1.2 Lineárne a nelineárne systémy	16
1.3 Diskrétné a spojité systémy	17
1.3.1 Diskrétné systémy	17
1.3.2 Spojité systémy	17
2 Reprezentácia systémov	19
2.1 Stavový opis systému.....	19
2.1.1 Stavy, vstupy a výstupy.....	19
2.1.2 Stavové rovnice	20
3 Opis modelu inteligentnej miestnosti	21
3.1 Objekt simulácie	21
3.2 Stavový opis miestnosti	21
3.2.1 Stavy	21
3.2.2 Poruchové veličiny	22
3.2.3 Vstupy	23
3.2.4 Výstupy	23
3.3 Implementácia stavového opisu	23
4 Prístupy k riadeniu.....	27
4.1 Požiadavky na riadený systém	27
4.2 ON-OFF (bang-bang) regulátor	28
4.3 PID regulátor.....	28
4.4 LQR regulátor	30

4.4.1	LQR v diskretnom čase na konečnom horizonte.....	31
4.4.2	LQR v diskretnom čase na nekonečnom horizonte	31
4.5	MPC regulátor.....	32
4.5.1	MPC v konkurencii ostatných prístupov k riadeniu	32
4.5.2	Schéma prediktívneho riadenia	33
4.5.3	Optimalizačný problém a jeho súčasti.....	34
4.5.4	Formulácia MPC	34
4.5.5	Posuvný horizont.....	35
5	Návrh riadenia	37
5.1	ON-OFF implementácia.....	37
5.2	PID implementácia	39
5.2.1	Regulácia na setpoint	39
5.2.2	Zónová regulácia	41
5.3	LQR implementácia	43
5.3.1	Reference tracking (sledovanie referencie).....	43
5.3.2	Offset free (bez odchýlky)	45
5.4	MPC implementácia.....	48
5.4.1	Formulácia ohraničení.....	48
5.4.2	Formulácia účelovej funkcie	49
5.4.3	Zmäkčenie ohraničení	49
5.4.4	Váhové matice.....	50
5.4.5	Formulácia MPC v Yalmip-e	50
6	Analýza navrhnutých regulátorov.....	55
6.1	Dosiahnutie tepelného komfortu	55
6.2	Energetické a ekonomické hľadisko	57
6.3	Konfrontácia dvoch najúspešnejších prístupov k riadeniu.....	59
7	Záver.....	62
	Zoznam použitej literatúry	63

Zoznam skratiek a termínov

HVAC	Heating, ventilation and air conditioning
SISO	Single-input single-output (system)
MIMO	Multiple-input multiple-output (system)
PID	Proportional–integral–derivative (controller)
LQR	Linear-quadratic regulator
MPC	Model predictive control
aktuátor	akčný člen; časť mechatronickej sústavy, ktorá prevádza informačnú časť procesu na technickú
perióda vzorkovania	zvolené obdobie, z ktorého sa berie reprezentatívna vzorka dát
predikčný horizont	dĺžka časového intervalu, na ktorej sa má vykonať predikcia správania sa systému
regulácia na setpoint	spôsob riadenia, ktorého cieľom je dosiahnuť presnú požadovanú hodnotu sledovanej veličiny
zónová regulácia	prístup k riadeniu, ktorý má za cieľ riadiť systém tak, aby sledovaná veličina dosahovala hodnoty zo zvoleného intervalu

Úvod

Automatizované systémy dnes už vo veľkej miere uľahčujú človeku prácu. Zaujímavú oblasť ich využitia predstavujú inteligentné budovy, ktoré svojim obyvateľom pomáhajú predovšetkým pri udržiavaní komfortu. Navyše nízkoenergetické, pasívne či autonómne domy prispievajú k šetreniu energie a ohľaduplnému zaobchádzaniu so životným prostredím.

Cieľom automatizácie budov v tejto špecifickej oblasti je počítačové prepojenie elektronických zariadení, ktoré sú navrhnuté na monitorovanie a riadenie mechanickej či osobnej bezpečnosti, ochrany pred požiarom, záplavami či zasiahnutím bleskom, no najmä na riadenie zatiaľ najviac rozvinutého systému vykurovania, ventilácie a klimatizácie (tzv. HVAC systém).

Keďže je táto oblasť veľmi široká a jej komplexné spracovanie by výrazne presiahlo rozsah tejto práce, zamerali sme sa na jeden z troch dôležitých atribútov HVAC systému – riadenie teploty v miestnosti. Ide o proces, v ktorom je zmena teploty v ohraničenom priestore meraná, prípadne zaznamenávaná a prispôbovaním prúdenia tepelnej energie do tohto priestoru sa snažíme dosiahnuť požadovanú teplotu v miestnosti.

Pri realizácii praktickej časti našej práce sme nemali možnosť reálne merať a riadiť teplotu skutočnej miestnosti. Vychádzali sme preto z matematického modelu, v ktorom sme postupne opísali jeho jednotlivé veličiny a stavové správanie. Následne sme systém reprezentovaný matematickým modelom implementovali do prostredia simulačného softvéru a graficky sme vyhodnotili jeho dynamiku.

Našou úlohou bolo navrhnúť a simulačne overiť MPC regulátor, ktorý reprezentuje prediktívne riadenie systému. Cieľom jeho implementácie bolo ovládať tepelné toky v budove tak, aby bola dosiahnutá požadovaná úroveň tepelného komfortu a zároveň bola minimalizovaná energia na vykurovanie. Zároveň sme sa však oboznámili aj s ďalšími typmi regulátorov, ktoré predstavovali alternatívne spôsoby návrhu riadenia. Pri ich implementácii do simulačného softvéru sme sledovali tie isté ciele riadenia ako pri návrhu MPC regulátora.

V závere tejto práce sme sa snažili zanalyzovať jednotlivé prístupy k riadeniu, vyhodnotiť kvalitu riadenia na základe vytýčených požiadaviek na riadený systém a prezentovať dosiahnuté výsledky. Takýmto spôsobom sme chceli zhrnúť dôležité poznatky z oblasti riadenia teploty v budovách aplikované na matematický model miestnosti.

1 Matematický model

Modelovanie predstavuje kognitívnu činnosť, ktorá nám umožňuje vytvárať modely na opis správania zariadení alebo iných objektov nášho záujmu. Existuje mnoho spôsobov, akými môžeme opísať správanie skúmaných objektov. Môžeme využiť slová, schémy, priestorové modely, počítačové programy alebo matematické formulácie. Inak povedané, modelovanie môžeme realizovať pomocou rôznych jazykov. Ak sa rozhodneme pre túto činnosť využiť matematický aparát, potom môžeme hovoriť o vytváraní matematického modelu. Samotný matematický model je teda reprezentáciou reálneho objektu alebo systému, ktorá na opis jeho správania využíva matematické premenné a výrazy [1].

Matematické modely sa často využívajú v technickej praxi, ale taktiež v prírodných a sociálnych disciplínach. Okrem opisu správania konkrétneho systému sú veľmi užitočné pri skúmaní reakcie systému na zmenu rôznych veličín, no majú veľký význam aj pri predikcii budúceho správania a napokon sa v praxi veľmi často využívajú na návrh riadenia alebo regulácie systému.

Matematický model môže byť tiež považovaný za akúsi transformáciu praktického a empirického poznania reálnych systémov na ich teoretický a zjednodušený model využitím matematického jazyka. Bohužiaľ, náš súčasný vonkajší svet je stále príliš komplikovaný na to, aby pri využití súčasných dostupných matematických nástrojov nedošlo k strate určitej presnosti. Dôležité teda je, aby bol matematický model dostatočne jednoduchý vzhľadom na jeho formuláciu a efektívnu analýzu, ktorá vyrieši pre nás dôležité problémy s využitím dostupnej výpočtovej kapacity. Na druhej strane, musí byť model dostatočne zložitý, aby dokázal na postačujúcej úrovni popísať detailné vlastnosti systému potrebné na jeho spoľahlivý opis. Je teda zrejmé, že na dosiahnutie oboch týchto protichodných cieľov je potrebné pristúpiť k určitým kompromisom.

V prvom rade je potrebné určiť najdôležitejšie časti systému, ktoré budú zahrnuté v modeli a naopak, vyčleniť z procesu modelovania menej dôležité súčasti systému, čím znížime úroveň náročnosti matematického modelu. V druhej rovine kompromisov potrebujeme uvažovať nad matematickými metódami, ktoré budú dostupné a využiteľné na riešenie čiastkových problémov. Opäť platí, že tieto metódy by mali byť dostatočne jednoduché ako aj samotný model, no zároveň vhodné na numerické výpočty a počítačové spracovanie.

Jedným zo spôsobov vytvorenia matematického modelu je jeho opis v tvare dynamického systému, ktorý reprezentuje časovo závislé zmeny v systéme. Zvyčajne teda býva takýto model opísaný diferenciálnymi rovnicami. Na základe svojej štruktúry a rôznych kritérií môžu byť dynamické systémy rozdelené do viacerých skupín.

1.1 SISO a MIMO systémy

V princípe môžeme tvrdiť, že dynamický systém je charakterizovaný odozvou na vstupný signál alebo inak povedané – charakterizuje vplyv vstupnej veličiny na výstupnú veličinu, ktorú meriame. V praxi môžu byť objektom nášho pozorovania systémy s jedným alebo viacerými vstupmi a s jedným alebo viacerými výstupmi. Podľa tohto kritéria môžeme potom dynamické systémy rozdeliť do nasledovných skupín:

- SISO (Single Input, Single Output)
- SIMO (Single Input, Multiple Outputs)
- MISO (Multiple Inputs, Single Output)
- MIMO (Multiple Inputs, Multiple Outputs)

1.1.1 SISO

SISO systém je najjednoduchším a najbežnejším typom dynamického systému, pri ktorom jeden výstup je regulovaný jediným vstupom. Práve jednoduchosť takéhoto systému umožňuje využiť jednoduchý regulátor navrhnutý pomocou polynomických výrazov, ktoré sú ľahko riešiteľné. Príkladom SISO systému môže byť audio systém, pri ktorom regulovaním vstupného signálu ovládame výstup v podobe zvukových vln z reproduktora.

1.1.2 MIMO

Oveľa zložitejšiu kategóriu dynamických systémov predstavujú MIMO systémy. Nielenže pozostávajú z viacerých vstupov a výstupov, ale tieto dokonca môžu medzi sebou interagovať. Náročnosť návrhu riadenia pre takéto systémy je daná ich komplexnosťou, pričom nie je možné použiť polynomický systém návrhu regulačných prvkov. Príkladom môžu byť súčasné veľké moderné teleskopy, ktorých zrkadlá pozostávajú z mnohých menších segmentov, pričom každý je ovládaný samostatne vlastným aktuátorom. Tvar celého zrkadla je neustále regulovaný kontrolným MIMO systémom tzv. aktívnej optiky, ktorý využíva vstupné informácie z početných senzorov umiestnených v ohniskovej rovine.

1.2 Lineárne a nelineárne systémy

Pre sústavu, ktorú môžeme nazvať lineárnym systémom, platí princíp superpozície. Znamená to, že za predpokladu $x_1(t) \rightarrow y_1(t)$ a $x_2(t) \rightarrow y_2(t)$ potom platia nasledovné dva princípy:

- aditivita (výstup pre súčet dvoch signálov bude rovnaký ako súčet výstupov pre tieto signály jednotlivo)

$$x_1(t) + x_2(t) \rightarrow y_1(t) + y_2(t) \quad (1)$$

- homogenita (výstup pre násobok iného vstupu bude rovný rovnakému násobku výstupu pre tento vstup)

$$ax_1(t) \rightarrow ay_1(t) \quad (2)$$

Protikladom k lineárnym systémom sú nelineárne sústavy. Z matematického hľadiska predstavujú také systémy, ktoré nespĺňajú princíp superpozície. V praxi to znamená, že v takomto systéme zmena výstupu nie je priamo úmerná zodpovedajúcej zmene vstupu [2].

Priemyselné procesy ako napríklad robotika majú väčšinou silnú nelineárnu dynamiku. Ak je to možné, v teórii riadenia sa preto využíva linearizácia takýchto systémov [3]. V matematike ide o metódu nahradenia časti krivky alebo priebehu funkcie priamkou. Inými slovami, využíva sa aproximácia lineárnou funkciou. Ak rozprávame o dynamických systémoch, linearizácia je metóda nahradenia diferenciálnej rovnice lineárnou diferenciálnou rovnicou v určitom rozsahu hodnôt.

1.3 Diskrétné a spojité systémy

V matematike a zvlášť v problematike dynamických matematických modelov môžeme pre premenné meniace sa v čase využiť dva alternatívne časové rámce – diskrétny a spojitý čas.

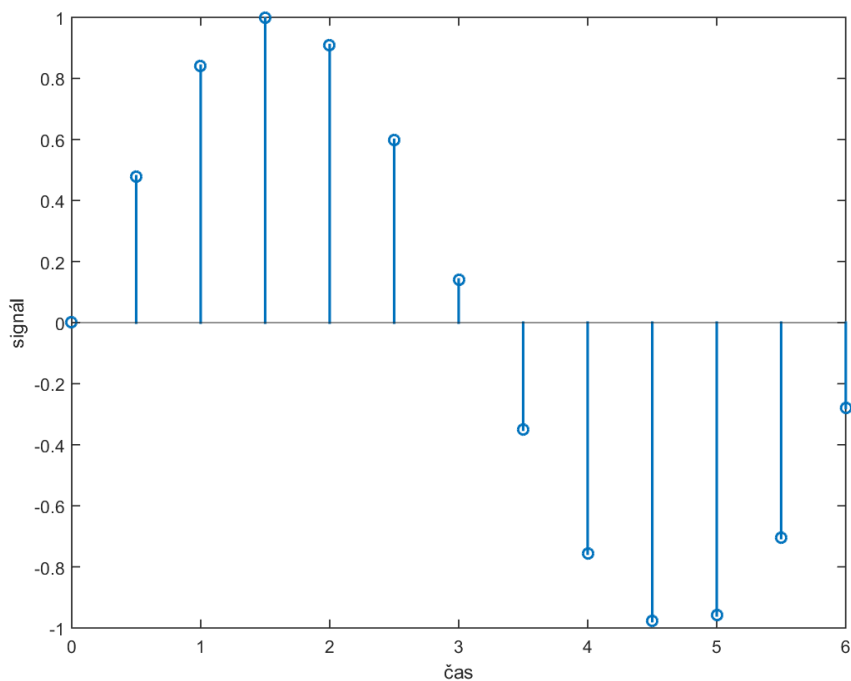
1.3.1 Diskrétné systémy

Diskrétné systémy využívajú zobrazenie časových hodnôt premenných v odlišných, oddelených „bodoch v čase“ [4]. Pri uvažovaní tohto princípu môžeme zmenu premennej diskrétneho systému chápať ako skok z jednej hodnoty na druhú rovnako, ako sa čas posunie od jedného „samostatného“ obdobia k druhému. Jednoducho sa to dá predstaviť na princípe digitálnych hodín. V jednom momente vidíme na displeji čas 7:45, ktorý sa v určitom momente zmení na hodnotu 7:46. V diskrétnych systémoch sa každá premenná nášho záujmu odmeria raz pri každom časovom úseku, pričom počet meraní medzi dvoma časovými obdobiami je konečný. Meranie sa zvyčajne vykonáva na sekvenčné celočíselné hodnoty.

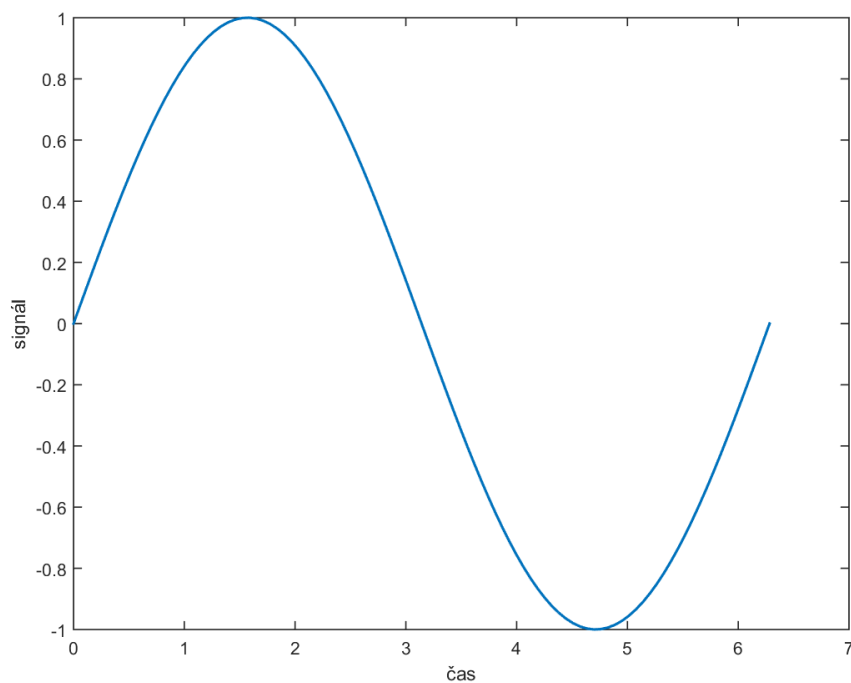
1.3.2 Spojité systémy

Alternatívou k diskrétnym systémom sú sústavy, v ktorých sa zmeny sledovaných veličín zachytávajú v spojitom čase. V ňom majú premenné určitú konkrétnu hodnotu iba v nekonečne krátkom čase. Zároveň medzi ľubovoľnými dvomi bodmi v čase je nekonečne veľa ďalších časových

bodov. Premenná čas potom prechádza celou množinou nezáporných reálnych čísel. Čas je teda vnímaný ako kontinuálna premenná a rovnako sú vnímané aj tie premenné, ktoré sú v spojitom systéme objektom nášho záujmu.



Obr. 1: Meranie signálu v diskretnom čase



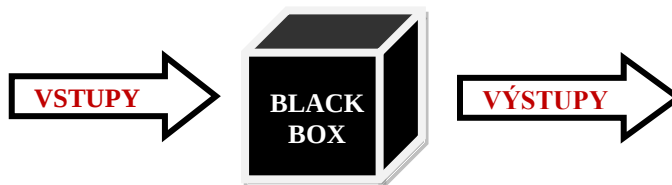
Obr. 2: Meranie signálu v spojitom čase

2 Reprezentácia systémov

Matematický model má byť presnou reprezentáciou dynamiky systému, aby bol schopný dať odpovede na otázky, ktoré vyplynú z neskoršej analýzy a simulácie. A práve to, na aké otázky chceme dostať odpoveď, ovplyvní výber toho správneho modelu. Z hľadiska koncepcie modelovania existuje viacero druhov modelov, avšak pre potreby tejto práce je dôležité detailnejšie sa oboznámiť s jednou z nich.

2.1 Stavový opis systému

Najčastejšie používanou koncepciou modelu pre systémy s viacerými vstupmi a viacerými výstupmi (MIMO systémy) je stavový opis. Na rozdiel od vonkajšieho opisu systému, pri ktorom daný systém považujeme za akúsi čiernu skrinku – „black box“ (skúmame len reakciu výstupu na vstupné podnety bez akejkoľvek znalosti o procesoch prebiehajúcich vnútri systému), stavový opis predstavuje vyšší stupeň reprezentácie systému.



Obr. 3: Schéma systému reprezentovaného čiernou skrinkou

Stavový opis vyjadruje dynamické vlastnosti systému vzťahmi medzi vstupom, výstupom a stavom. Takýto matematický model konkrétného fyzikálneho systému pracuje s diferenciálnymi rovnicami prvého rádu [5].

2.1.1 Stav, vstupy a výstupy

Stav systému predstavuje najmenší možný počet stavových premenných, ktoré dokážu reprezentovať celkový stav systému v akomkoľvek zadanom čase [6]. Je reprezentovaný stavovým vektorom (stĺpcový vektor označovaný $\mathbf{x}(t)$), ktorého zložky tvoria stavové premenné. Stavovými premennými sú časové funkcie, ktoré určujú stav dynamického systému.

Okrem stavového vektora rozlišujeme v stavovom opise aj stĺpcový vektor vstupov $\mathbf{u}(t)$ a stĺpcový vektor výstupov $\mathbf{y}(t)$.

2.1.2 Stavové rovnice

Väzbu medzi stavom a vstupmi a výstupmi systému vyjadrujú stavové rovnice. Prvá z nich umožňuje väzbu derivácie stavovej premennej na stav, resp. vstup a má tvar

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t) \quad (3)$$

Druhá stavová rovnica určuje vzťah medzi vektorom výstupu a vektorom stavu, resp. medzi vektorom výstupu a vektorom vstupu

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (4)$$

Koeficienty **A**, **B**, **C**, **D** vystupujúce v rovniciach (3) a (4) predstavujú matice systému a sú definované nasledovne:

A – matica vnútorných väzieb systému nazývaná tiež matica systému,

B – matica väzieb systému na vstup alebo tzv. matica riadenia,

C – matica väzieb výstupu na stav,

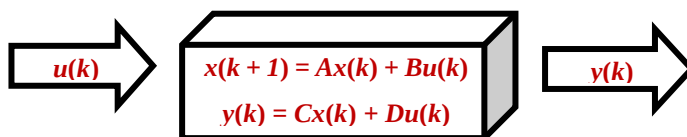
D – matica väzieb vstupu na výstup (z hľadiska dynamických vlastností je jej vplyv zanedbateľný a často sa považuje za nulový).

Ako už bolo spomenuté, pre dynamický systém a jeho premenné meniace sa v čase môžeme využiť dva alternatívne časové rámce. Pre systém, ktorého dynamiku vyjadrujeme v diskretnom čase, môžeme potom stavové rovnice transformovať do nasledovnej podoby:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (5)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) \quad (6)$$

Keďže stavové rovnice vyjadrujú vzájomné väzby stavov, vstupov a výstupov v systéme, nazýva sa tento prístup aj modelom bielej skrinky – „white box“.



Obr. 4: Schéma systému reprezentovaného stavovým opisom v diskretnom čase

3 Opis modelu inteligentnej miestnosti

3.1 Objekt simulácie

Predmetom matematického modelovania, analýzy a následného návrhu riadiacich algoritmov v tejto práci je model inteligentnej miestnosti. Miestnosť sama osebe je takmer vždy súčasťou väčšieho celku, budovy, ktorá môže byť tiež predmetom riadenia. Budova však predstavuje oveľa zložitejší komplex, ktorý napokon aj tak pozostáva z menších jednotiek, pre ktoré je potrebné vytvoriť samostatný matematický model a na ňom implementovať aj vyhovujúci návrh riadenia. Napokon aj pre jednoduchosť a pochopenie základných princípov stavového opisu, ako aj pre lepšiu kontrolu funkčnosti navrhnutých regulátorov, je samostatná miestnosť vhodným objektom matematickej simulácie.

Náš objekt si môžeme predstaviť ako jednoduchú zastrešenú miestnosť so štvorcovým pôdorysom, pevnými neizolovanými stenami a vykurovacím médiom. Výmena tepla prebieha medzi médiom a vnútorným prostredím miestnosti, medzi miestnosťou a vonkajším okolím, ale aj vnútri miestnosti za prítomnosti ľudí, ktorí ju môžu v určitom čase obývať.

Pre opis riadeného objektu – v našom prípade miestnosti, je potrebné vyjadriť dynamické vlastnosti systému vzťahmi medzi vstupom, výstupom a stavom systému. Inými slovami, samotnú miestnosť je potrebné z hľadiska cieľov tejto práce stavovo popísať.

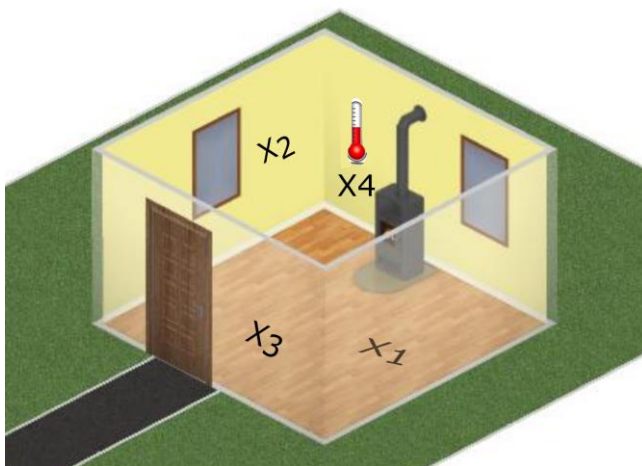
3.2 Stavový opis miestnosti

3.2.1 Stav

Pod stavom systému rozumieme vnútornú charakteristiku systému, hodnota ktorej v určitom okamihu určuje hodnotu výstupnej veličiny v tom istom čase za predpokladu, že poznáme hodnotu vstupnej veličiny v tomto čase a v predchádzajúcom časovom intervale (histórii, ktorá sa ešte v správaní systému prejavuje) [7].

V prípade miestnosti, ktorú opisujeme, môžeme definovať štyri stavy:

- x_1 – teplota podlahy (*t floor*)
- x_2 – teplota vnútornej steny miestnosti (*t internal facade*)
- x_3 – teplota vonkajšej fasády miestnosti (*t external facade*)
- x_4 – teplota vo vnútri miestnosti (*t internal*)



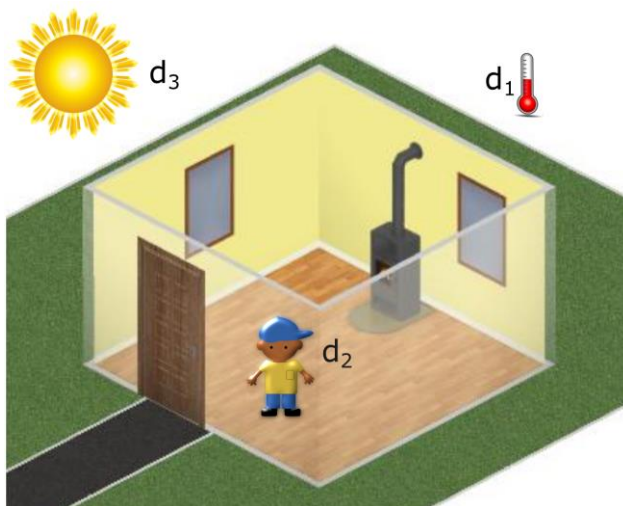
Obr. 5: Schematické znázornenie stavových veličín miestnosti

3.2.2 Poruchové veličiny

Pod poruchovou veličinou rozumieme takú veličinu, ktorej pôsobenie vyvolá odchýlku regulovanej (riadenej) veličiny od požadovanej či nastavenej hodnoty. Je ale potrebné zdôrazniť, že poruchová veličina spôsobuje neúmyselnú a nepredvídanú zmenu regulovanej veličiny.

V prípade našej miestnosti opisujeme tri takéto poruchové veličiny:

- d_1 – vonkajšia teplota ($t_{external}$)
- d_2 – teplo vyžiarené ľuďmi nachádzajúcimi sa v miestnosti ($Q_{occupancy}$)
- d_3 – teplo pochádzajúce zo slnečného žiarenia (Q_{solar})



Obr. 6: Znázornenie poruchových veličín

3.2.3 Vstupy

Vstupné veličiny alebo vstupy v matematickom modeli systému vyjadrujú pôsobenie určitého akčného zásahu na objekt.

V prípade modelu miestnosti je vstupom jediná veličina. Je ňou náš akčný zásah, ktorým priamo regulujeme intenzitu vykurovania. V praxi to teda predstavuje nastavenie výkonu vykurovacieho zariadenia. Kotel, ktorý sme uvažovali pri neskoršej implementácii riadenia tepelného komfortu v miestnosti, bol schopný poskytnúť výkon v rozsahu od 0 do 5000 W.

3.2.4 Výstupy

Výstupy sú zase naopak tie veličiny dynamického systému, ktoré už vyjadrujú pôsobenie objektu na prostredie, v ktorom sa nachádza. V prípade výstupov ide väčšinou o tie veličiny, ktoré nás z hľadiska riadenia daného systému zaujímajú najviac, pretože sú na nich kladené určité požiadavky, ktorých splnenie je cieľom samotného riadenia. Rovnako ako vstupy, aj výstupy majú svoj fyzikálny význam.

Veličinou, ktorá predstavuje výstup v našom modeli, je teplota vnútri miestnosti. Ide teda o konkrétnu meranú veličinu so svojou fyzikálnou interpretáciou. V neskorších kapitolách bude možné vidieť, že našou úlohou bolo docieľiť, aby sa práve táto výstupná veličina nachádzala v stanovenom intervale tzv. komfortnej zóny.

3.3 Implementácia stavového opisu

Po vonkajšom, ale aj stavovom opise modelu miestnosti a definovaní jeho vstupných, výstupných, stavových i poruchových veličín, bolo ďalším krokom prevedenie matematického modelu do jazyka modelovacieho nástroja. Prostredím, v ktorom boli model miestnosti a návrhy regulácie systému realizované, bol softvérový nástroj MATLAB.

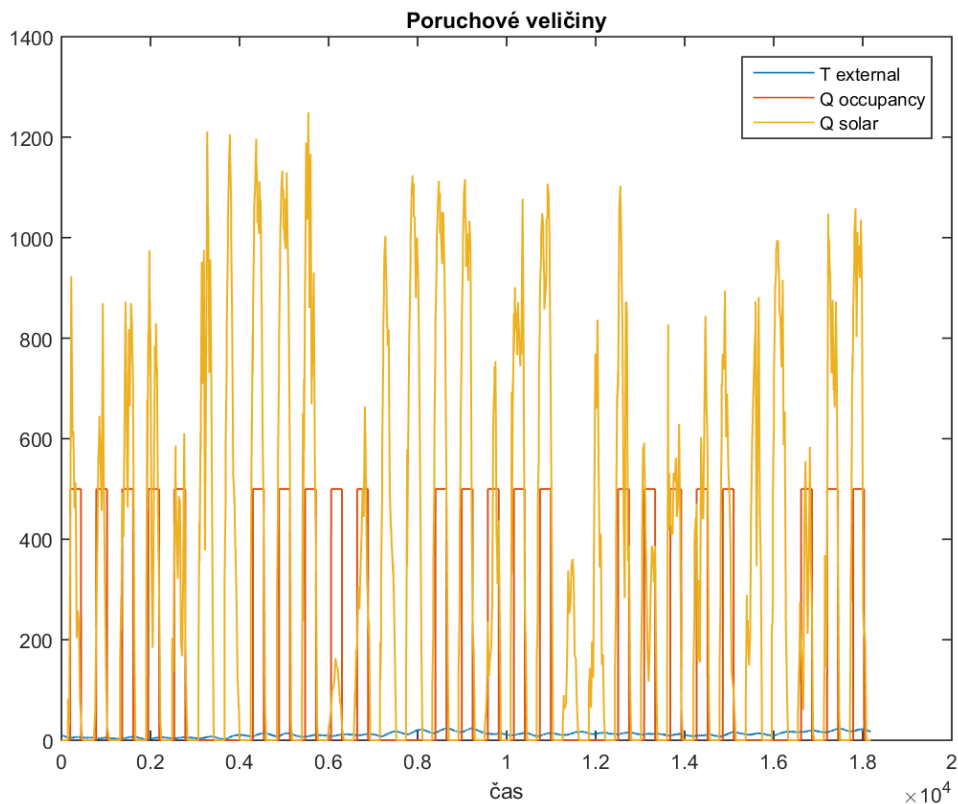
Štvorcové matice (4x4) stavového opisu A , B , C , D boli súčasťou súboru `ss_model.mat`, ktorý sme mali k dispozícii. Okrem neho bol súčasťou implementácie nášho modelu aj ďalší súbor `wpred_1979_may_Ts300.mat`, z ktorého sme čerpali historické profily porúch ako maticu rozmerov 18178x8. Z nej sme ale vybrali len tie údaje, ktoré zodpovedali trom poruchovým veličinám systému. Spolu s načítaním periódy vzorkovania dát boli v skripte reprezentované nasledujúcimi príkazmi:

```
% nacitaj stavovy model budovy
load ('ss_model.mat')
% nacitaj historicke profily poruch
load ('wpred_1979_may_Ts300')
```

```
% základna perioda vzorkovania dat
base_Ts = y(2,1);
% profily poruch
Disturb = [y(:,4)'; y(:,end-1)'; y(:,end)']; % T_ext, Q_occ, Q_sol
```

Vykreslením časovej závislosti poruchových veličín je možné prehľadne vidieť ich priebeh v dynamickom systéme.

```
% vykreslenie casovych priebehov poruch
plot(Disturb')
title('Poruchové veličiny')
legend('T external', 'Q occupancy', 'Q solar')
xlabel('čas')
```



Obr. 7: Vykreslenie časových priebehov poruchových veličín

V grafickom znázornení časového priebehu poruchových veličín je možné vidieť vplyv slnečného žiarenia v závislosti od striedania dní a nocí, pôsobenie vonkajšej teploty, ale aj obsadenosť miestnosti ľuďmi. Keďže tá sa pravidelne vyskytuje v piatich po sebe idúcich dňoch, pričom nasledujúce dva dni je potom miestnosť neobsadená, môžeme sa domnievať, že ide o priestor využívaný nejakou spoločnosťou v pracovných dňoch.

V ďalšom kroku bolo potrebné vytvoriť z matic A , B , C , D stavový opis modelu. V MATLAB-e na to slúži jednoduchý príkaz v tvare `model = ss(A,B,C,D)`. Takto vytvorený model však predstavoval systém s viacerými vstupmi a viacerými výstupmi v spojitom čase. Diskretizáciu a tzv. spomalenie dynamiky systému sme dosiahli nasledujúcou sekvenciou príkazov:


```

% diskretizacia
Ts = 15;
sd = c2d(ss(A, B, C, D), Ts);
% spomalenie dynamiky modelu
Ad = sd.A;
Bd = sd.B(:, 2);
Cd = sd.C(4, :);
Ed = sd.B(:, [1 3 4]);
Dd = 0;

```

Keďže našou snahou bolo namodelovať dynamický systém, ktorý v každom jednom kroku stavovým veličinám priradí ich zodpovedajúce hodnoty a tak bude odrážať jeho správanie, implementovali sme do kódu tzv. otvorenú slučku. Udaním počtu simulačných krokov, inicializovaním počiatočných hodnôt a využitím rovníc stavového opisu systému, sme vytvorili model dynamiky miestnosti:

```

% simulacne kroky
Nsim = 1200;
% inicializacia hodnot
x0 = 21*ones(size(A,1),1);
u0 = 5000;
p0 = Disturb(:,1:Nsim);
% vektory
X = x0;
Y = [];
U = [];
P = [];
time = 1:Nsim;

for i=1:Nsim
    x0 = X(:,end);
    xkn = Ad*x0 + Bd*u0 +Ed*p0(:,i);
    yk = Cd*x0 + Dd*u0;
    X = [X, xkn];
    Y = [Y, yk];
    U = [U, u0];
    P = [P, p0(:,i)];
end

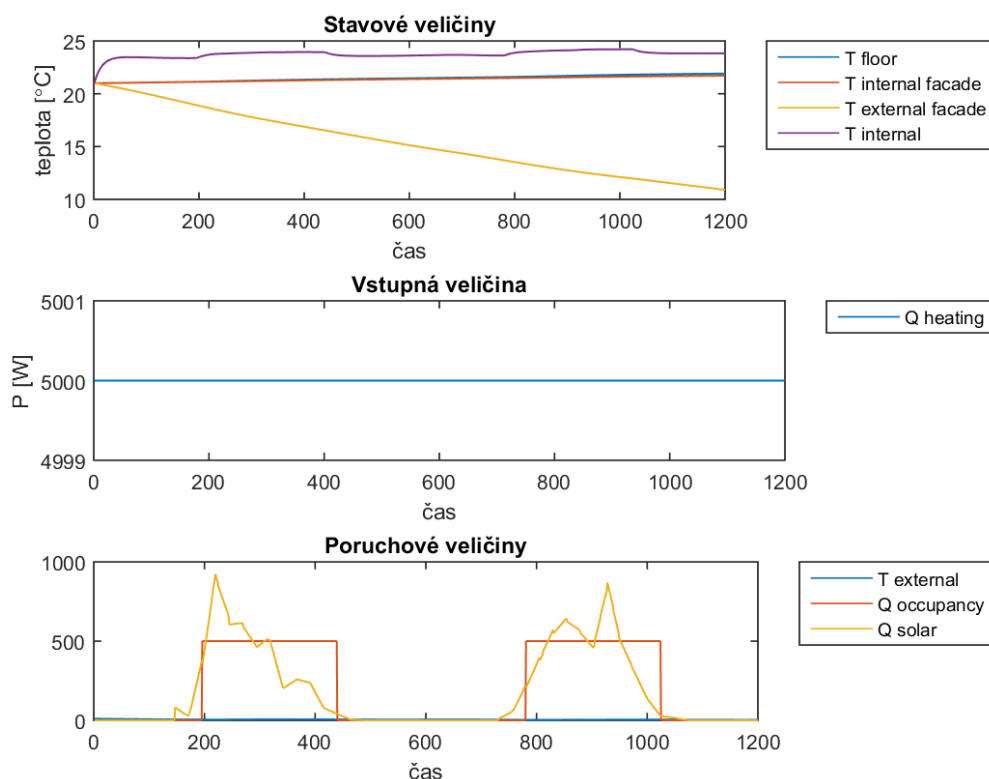
```

Aj v tomto momente sme vykreslili grafy, ktoré lepšie znázornili dynamiku systému a zároveň potvrdili správnosť implementácie modelu v skripte.

```

figure
subplot(3,1,1)
plot(time, X(:,1:end-1))
title('Stavové veličiny')
legend('T floor','T internal facade','T external facade','T internal','location','bestoutside')
xlabel('čas')
ylabel('teplota [\circ C]')
subplot(3,1,2)
plot(time,U)
title('Vstupná veličina')
legend('Q heating','location','bestoutside')
xlabel('čas')
ylabel('P [W]')
subplot(3,1,3)
plot(time,P)
title('Poruchové veličiny')
legend('T external','Q occupancy','Q solar','location','bestoutside')
xlabel('čas')
ylabel('')

```

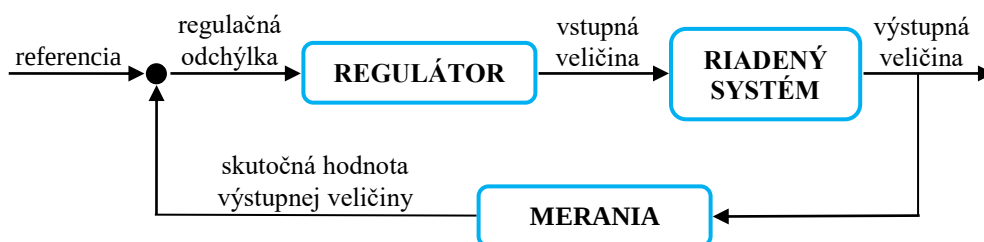


Obr. 8: Grafické znázornenie dynamiky stavových, vstupných a poruchových veličín

V grafe môžeme okrem už známych poruchových veličín vidieť priebeh všetkých štyroch stavových veličín, ktoré sa v čase menia. Ako je tiež vidieť, v celom priebehu simulačného času (tentokrát doba dvoch dní) je hodnota vstupu (výkonu kotla) konštantná, nakoľko sme ju inicializovali na túto hodnotu a v priebehu simulácie sa s časom nemenila. Práve zmenou jej hodnoty a analýzou vplyvu na výstupnú veličinu (teplotu v miestnosti) sa budeme neskôr snažiť riadiť tento systém.

4 Prístupy k riadeniu

Obvyklým cieľom teórie riadenia je ovládanie systému takým spôsobom, aby jeho výstup sledoval požadovaný výstupný signál, tzv. referenciu, ktorej hodnota môže byť pevne stanovená alebo sa môže v čase meniť. K dosiahnutiu tohto cieľa je navrhnutý regulátor, ktorý monitoruje výstup a porovnáva ho s požadovanou hodnotou. Regulačná odchýlka je potom definovaná ako rozdiel medzi skutočnou a požadovanou výstupnou hodnotou. Regulačná odchýlka je následne aplikovaná ako spätná väzba pre vstup systému, ktorý mení svoju hodnotu tak, aby bol skutočný výstup bližšie k požadovanej referencii. Takýto spôsob riadenia, pri ktorom sa využíva spätná väzba na reguláciu správania systému, sa nazýva aj systémom uzavretej slučky (closed-loop system).



Obr. 9: Všeobecná schéma uzavretej slučky

4.1 Požiadavky na riadený systém

V praxi sa používa veľa typov regulátorov, ktoré využívajú štruktúru uzavretej slučky. Výber konkrétneho typu regulátora závisí od požiadaviek, ktoré sú na riadenie kladené. V prípade riadenia vnútornej teploty našej miestnosti išlo pri riadení systému o dve konkrétne požiadavky.

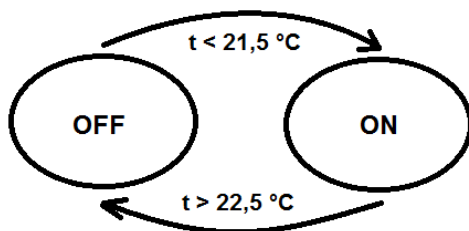
V prvom rade bolo našou snahou riadiť systém tak, aby sme sledovali referenciu, ktorá bola pre náš systém stanovená na 22 °C. Nebolo však našim cieľom, aby systém v každom okamihu dosahoval túto teplotu. Rozhodli sme sa tolerovať určitý interval teplôt v okolí referencie, ktorý bude spĺňať požiadavku tepelného komfortu v našej miestnosti. V technickej praxi je za primeranú odchýlku považovaná hodnota $\pm 0,5$ °C. Interval teplôt, v ktorom sme sa teda chceli nachádzať po uradení nášho systému, tak predstavoval hodnoty výstupnej veličiny v rozmedzí od 21,5 do 22,5 °C.

Druhá požiadavka, ktorú mal náš riadený systém spĺňať, sa týkala celkovej spotreby energie. V praxi ide vždy o to, aby daný systém nielen dodržal určité požiadavky na sledovanú veličinu, ale aby bola prevádzka takéhoto systému aj ekonomicky prijateľná. V našom prípade išlo o snahu nájsť taký spôsob riadenia, ktorý bude spotrebúvať najmenšie množstvo energie, ktoré do systému privádzame použitím vykurovacieho média.

4.2 ON-OFF (bang-bang) regulátor

Najjednoduchším typom spätnoväzbového regulátora je ON-OFF regulátor. Je to druh riadiaceho prvku v systéme, ktorý náhle prepína medzi dvoma stavmi [8]. Často sa teda používa na riadenie zariadení, ktoré prijímajú binárny vstup, napríklad riadenie vykurovacieho kotla, ktorý je buď zapnutý alebo vypnutý (žiadna iná možnosť medzi týmito dvoma vstupmi pri ON-OFF riadení neexistuje). Väčšina bežných obytných termostátov sú radiče bang-bang, ale môžeme sa s nimi stretnúť aj pri ostatných zariadeniach denného použitia, akými sú napríklad žehličky, varné kanvice, prietokové ohrievače vody a mnohé iné.

Vo všetkých spomenutých prípadoch býva signálom k prechodu z jedného stavu do druhého splnenie danej podmienky, napríklad hodnoty teploty. Ak v danom kroku sledovaná veličina spĺňa podmienku na prechod do druhého stavu, regulátor prepne vstupný signál do druhej polohy a systém v tomto stave zotrúva, kým sa nesplní podmienka „odchodu“ z tohto stavu.



Obr. 10: Bloková schéma ON-OFF riadenia vykurovania

Použitie ON-OFF riadenia nemusí byť v niektorých prípadoch pohodlné pre človeka, navyše môže tiež dochádzať k tzv. prekmitom cez stanovené hranice sledovanej veličiny a taktiež má tento typ riadenia aj svoje ekonomické obmedzenia. Napriek tomu je pre svoju jednoduchosť implementácie často využívaným typom regulátora.

4.3 PID regulátor

Ďalším typom spätnoväzbového regulátora vo veľkej miere využívaného v priemyselných riadiacich systémoch je proporcionálne-integračne-derivačný regulátor (PID). Aj tento regulačný prvok nepretržite vypočítava regulačnú odchýlku ako rozdiel medzi hodnotou meranej procesnej veličiny a požadovanou hodnotou. Regulátor sa snaží minimalizovať chyby v čase nastavením riadiacej veličiny (poloha ventilu, tlmič, výkon dodávaný do vykurovacieho zariadenia atď.) na novú hodnotu určenú váženým súčtom:

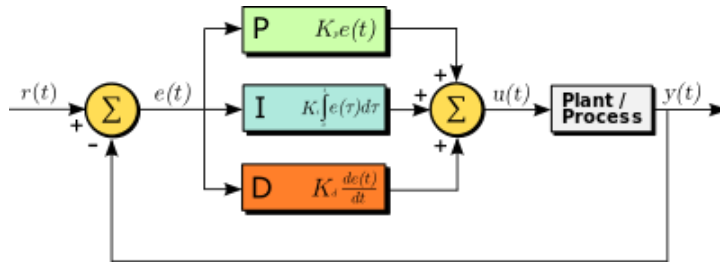
$$u(t) = Pe(t) + I \int_0^t e(\tau) d\tau + D \frac{de(t)}{dt} \quad (7)$$

V prípade modelu systému v diskrétnom čase môžeme túto rovnicu upraviť na nasledovný tvar:

$$u(k) = Pe(k) + I \sum_0^m e(k) + D\Delta e(k) \quad (8)$$

Označenia P , I a D v rovniciach (7) a (8) predstavujú nezáporné koeficienty pre proporcionálnu, integračnú a derivačnú zložku PID regulátora [9].

- Proporcionálna zložka predstavuje akýsi zosilňovač s nastaviteľnou hodnotou koeficientu P .
- Integračná zložka reprezentuje integrátor s nastaviteľným koeficientom I . Hodnota akčného zásahu je použitím I -zložky regulátora priamo úmerná integrálu regulačnej odchýlky. Táto zložka je zaujímavá tým, že dokáže úplne eliminovať regulačnú odchýlku. Jej nevýhodou však je, že v praxi môže vplyvom integrácie dochádzať k prekmitom.
- Derivačná zložka v sebe obsahuje derivátor s nastaviteľným koeficientom D . Používa sa na zrýchlenie regulačného deja. Ako vyplýva z matematického zápisu, v D -zložke regulátora je hodnota akčnej veličiny priamo úmerná derivácii regulačnej odchýlky. Použitie tejto zložky zosilňuje šum, čo sa považuje za jej nevýhodu a za určitých okolností môže dôjsť až k nepoužiteľnosti regulátora. Je dôležité povedať, že samostatne sa D -regulátor nikdy nevyskytuje. D -zložka je vždy súčasťou PD alebo PID regulátora.



Obr. 11: Schéma uzavretej slučky s PID regulátorom

PID regulátor je široko použiteľný, pretože sa nezameriava na poznanie samotného procesu, ale len na merané procesné veličiny. Je schopný riešiť špecifické požiadavky riadeného systému vďaka vhodnej úprave jeho troch parametrov. Keďže vstupom do PID regulátora je regulačná odchýlka $e(t)$ a výstupom hodnota akčného zásahu $u(t)$, regulátor je vhodnejší na tzv. riadenie na regulačnú odchýlku a už menej na riadenie na nastavenú hodnotu. Je tiež potrebné si uvedomiť, že použitie PID regulátora nezaručuje optimálne riadenie systému a ani jeho stabilitu [9].

Úprava regulačných parametrov (koeficientov P , I , D) na optimálne hodnoty pre požadovanú odozvu systému sa nazýva ladenie regulátora alebo tuning. Aj keď ide len o nastavenie troch

parametrov regulátora, ladenie predstavuje v praxi dosť zložitý problém. Okrem splnenia požiadaviek na uriadenie systému je nevyhnutné dodržať aj základnú požiadavku, ktorou je jeho stabilita [9].

Základným spôsobom tuningu je tzv. ručné ladenie. Podľa známych vplyvov na dynamiku systému môžeme intuitívne navrhnúť jednotlivé koeficienty PID regulátora a následne ich opakovane doladovať až na prijateľné konečné hodnoty.

Tabuľka 1: Vplyv nezávislého zvyšovania parametrov PID regulátora

Parameter	Stabilita	Prekmity	Čas regulácie	Regulačná odchýlka
P	zhoršuje	zvyšuje	malá zmena	znižuje
I	zhoršuje	zvyšuje	zvyšuje	odstraňuje
D	zlepšuje, ak D je malé	znižuje	znižuje	nemá vplyv

Okrem ručného ladenia existujú oveľa prepracovanejšie metódy, ako napríklad Ziegler-Nicholsova metóda, metóda umiestnenia pólov, ale aj možnosti využitia softvérových balíčkov, akými sú napríklad *pidTuner*, ktorý je súčasťou MATLAB-u.

4.4 LQR regulátor

LQR regulátor (Linear Quadratic Regulator) je ďalším spätnoväzbovým regulátorom, ktorý už ale svojou povahou patrí do oblasti optimálneho riadenia. Tento spôsob riadenia sa snaží nájsť pre daný systém taký princíp regulácie, aby boli splnené určité podmienky optimality. Problém riadenia zahŕňa účelovú funkciu stavov a riadiacich veličín. Úlohou optimálneho riadenia je potom súborom diferenciálnych rovníc opísať dynamiku riadiacich veličín, ktoré budú minimalizovať účelovú funkciu [10].

Ak je dynamika systému opísaná súborom lineárnych diferenciálnych rovníc, pričom účelová funkcia má kvadratický charakter, hovoríme o tzv. LQ probléme. Riešenie takéhoto problému poskytuje práve lineárny kvadratický regulátor [11].

Nastavenie LQR regulátora, ktorým sa riadi zariadenie alebo proces, v princípe zahŕňa nájdenie takého matematického algoritmu, ktorý minimalizuje účelovú funkciu s váhovými faktormi navrhnutými človekom (inžinierom). Pod účelovou funkciou rozumieme funkciu definovanú ako súčet odchýlok sledovaných veličín od ich požadovaných hodnôt. Algoritmus prakticky nájde také nastavenia regulátora, ktoré minimalizujú nežiaduce odchýlky, ako napríklad odchýlky od požadovanej teploty v riadenom procese.

Zjednodušené môžeme povedať, že LQR algoritmus je zautomatizovaný spôsob nájdenia vhodného spätnoväzbového regulátora, ktorý sa postará o únavnú prácu bežne vykonávanú inžinierom pri optimalizácii regulátora. Úlohou človeka však naďalej ostáva určiť váhové faktory a porovnávať výsledky so špecifickými požiadavkami návrhu riadenia. To vedie k záveru, že syntéza regulátora bude naďalej iteračným procesom, počas ktorého inžinier hodnotí zhotovený regulátor prostredníctvom simulácie a následne upravuje váhové faktory tak, aby riadený systém dosiahol stanovené ciele. A práve náročnosť pri hľadaní optimálnych váhových faktorov obmedzuje využitie regulátora založeného na princípe LQR [11].

4.4.1 LQR v diskretnom čase na konečnom horizonte

Z matematického hľadiska je lineárny systém v diskretnom čase opísaný nasledovne:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \quad (9)$$

s účelovou funkciou

$$\min_u J = \min_u \sum_{k=0}^{N-1} (x_k^T Q x_k + u_k^T R u_k + 2x_k^T N u_k) + x_N^T Q_N x_N \quad (10)$$

ohraničením

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k, x_0 = x(0) \quad (11)$$

a spätnou väzbou

$$u_k = -F_k x_k \quad (12)$$

kde

$$F_k = (R + B^T P_k B)^{-1} (B^T P_k A + N^T) \quad (13)$$

pričom P_k z rovnice (13) sa nájde iteráciami spätne v čase (od N po 0) pomocou dynamickej Riccatiho rovnice:

$$P_{k-1} = A^T P_k A - (A^T P_k B + N)(R + B^T P_k B)^{-1} (B^T P_k A + N^T) + Q \quad (14)$$

od konečnej podmienky [12, 13]:

$$P_N = Q_N \quad (15)$$

4.4.2 LQR v diskretnom čase na nekonečnom horizonte

V diskretnom čase je lineárny systém opísaný opäť nasledovne:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \quad (16)$$

s účelovou funkciou

$$\min_u J = \min_u \sum_{k=0}^{\infty} (x_k^T Q x_k + u_k^T R u_k + 2x_k^T N u_k) \quad (17)$$

ohraničením

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k, x_0 = x(0) \quad (18)$$

a spätnou väzbou

$$u_k = -F_k x_k \quad (19)$$

kde

$$F_k = (R + B^T P B)^{-1} (B^T P A + N^T) \quad (20)$$

pričom P je jedinečné kladne definitné riešenie Riccatiho rovnice v diskretnom čase [12, 13]:

$$P = A^T P A - (A^T P B + N)(R + B^T P B)^{-1} (B^T P A + N^T) + Q \quad (21)$$

4.5 MPC regulátor

Jedným z najdôležitejších, no zároveň najčastejšie zanedbávaných aspektov v klasickej teórii riadenia, je existencia ohraničení na vstupy (akčné zásahy), výstupy aj stavy riadeného systému [14]. V praxi to napríklad znamená, že vstupný signál vygenerovaný navrhnutým regulátorom môže byť z matematického pohľadu správny, avšak neberie do úvahy reálne možnosti vykurovacieho média, ktoré je schopné do systému poslať akčný zásah v rozsahu od 0 do 5000 W. Regulátory typu ON-OFF, PID a ani LQR sa nezaobierajú existenciou takýchto reálnych technologických či fyzikálnych ohraničení. A práve schopnosť vysporiadať sa s nimi predstavuje tú hranicu, ktorá oddeľuje prediktívne riadenie od akejkoľvek inej teórie použitej na návrh riadenia.

4.5.1 MPC v konkurencii ostatných prístupov k riadeniu

Prediktívne riadenie označované tiež ako Model Predictive Control (MPC) disponuje okrem schopnosti vysporiadať sa s ohraničeniami ďalšími prednosťami. V konkurencii PID a LQR regulátorov, ktoré sú najčastejšie využívané v praxi, to môžeme najlepšie ilustrovať na schopnostiach spĺňať nasledovné tri kritériá.

Prvým z nich je schopnosť daného spôsobu riadenia vysporiadať sa s reguláciou viac rozmerových (MIMO) systémov. Ďalším určujúcim kritériom je schopnosť regulátora nejakým spôsobom optimalizovať výkonnosť, napr. minimalizovať spotrebu energie. Treťou a už spomenutou charakteristikou riadenia je garancia toho, že daný spôsob návrhu regulátora dokáže zobrať do úvahy technologické či fyzikálne ohraničenia. Do akej miery sú schopné jednotlivé typy regulátorov spĺňať tieto kritériá, je možné vidieť v nasledujúcej tabuľke [14].

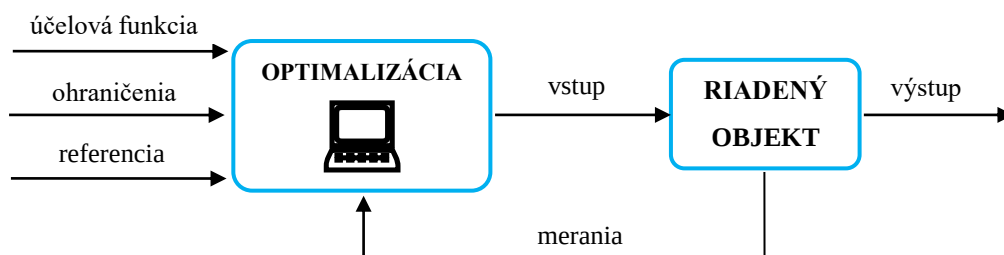
Tabuľka 2: Splnenie kritérií riadenia jednotlivými typmi regulátorov

Typ regulátora	Riadenie MIMO systémov	Optimalizácia výkonnosti	Riešenie ohraňení
<i>PID</i>	NIE	NIE	NIE
<i>LQR</i>	ÁNO	ÁNO	NIE
<i>MPC</i>	ÁNO	ÁNO	ÁNO

Z uvedeného porovnania môžeme jasne vidieť, že prediktívne riadenie spĺňa všetky tri dôležité kritériá a v konkurencii ostatných typov regulátorov je tým najvyspelejším prístupom k riadeniu. Je však tiež veľmi potrebné povedať, že spolu s rastúcim počtom splnených kritérií jednotlivých regulátorov rastie aj zložitosť ich implementácie. V tomto smere teda MPC predstavuje aj vrchol čo sa týka zložitosti návrhu a implementácie takéhoto typu riadenia.

4.5.2 Schéma prediktívneho riadenia

Ako už bolo spomenuté, prediktívne riadenie je oproti klasickým typom regulátorov veľmi vyspelým spôsobom riadenia. Napriek tomu však vzhľadom k jeho implementácii ide len o ďalší spätnoväzbový prístup k riadeniu v uzavretej slučke. V riadenom objekte meriame konkrétne veličiny, pričom sledovanú riadenú veličinu porovnávame s hodnotou referencie a tomu prispôbujeme akčný zásah do systému.



Obr. 12: Bloková schéma MPC riadenia

Jediným a najpodstatnejším rozdielom je formulácia regulátora. Kým pri doteraz spomenutých prístupoch k riadeniu bol regulátor daný konkrétnym vzťahom, resp. funkciou, ktorej parametre sú známe, pri prediktívnom riadení sú akčné zásahy opísané optimalizačným problémom, ktoré potrebujeme opakovane riešiť. Zatiaľ čo pri predchádzajúcich prístupoch regulátor v každom kroku vyhodnocuje danú funkciu, MPC musí v každom z týchto krokov vyriešiť optimalizačný problém. Čas na vyriešenie tohto problému závisí od periódy vzorkovania, ktorá môže v technickej praxi predstavovať hodiny, ale aj oveľa menšie časové intervaly, ktoré sa môžu hýbať rádovo

v milisekundách. Takýto prístup k riadeniu teda kladie vysoké požiadavky na výkonnosť výpočtového hardvéru, čo je okrem zložitosti návrhu a implementácie MPC ďalšia z nevýhod tohto typu riadenia. Napriek tomu môžeme povedať, že prednosti prediktívneho riadenia výrazne prevyšujú vedomostné a softvérové nároky, ktoré sú s jeho použitím spojené.

4.5.3 Optimalizačný problém a jeho súčasti

Kľúčovým prvkom MPC riadenia je už spomínaný optimalizačný problém, ktorý pozostáva z viacerých častí. Prvá z nich súvisí so samotným názvom prediktívneho riadenia, z ktorého je zrejmé, že takýto prístup by mal v sebe zahŕňať predikciu. Znamená to, že v konkrétnom kroku (v súčasnosti) odmeriame parametre systému (napr. stavy) a budeme schopní predpovedať vývoj systému do budúcnosti. Práve tieto informácie o budúcej reakcii systému na terajší akčný zásah vieme využiť na optimalizáciu výkonnosti systému. Podobnú funkciu plní derivačná zložka PID regulátora, avšak ide iba o približnú aproximáciu budúceho správania, pričom pri MPC riadení sa vieme pozrieť na jej exaktnú reprezentáciu [14].

Ďalším aspektom, ktorý v sebe zahŕňa optimalizačný problém, sú ohraničenia. Nie sú však v systéme prítomné samostatne, ale súčasne s predchádzajúcim prvkom – predikciou. Znamená to, že v takto riadenom systéme berieme do úvahy nielen súčasné, ale aj budúce splnenie ohraničení, čo je veľkou prednosťou prediktívneho riadenia.

Poslednou dôležitou zložkou MPC riadenia je tzv. účelová funkcia, ktorá je matematickým vyjadrením toho, čo chceme optimalizovať. V praxi môže ísť o minimalizáciu, ale aj maximalizáciu určitej veličiny. V prípade riadenia inteligentnej miestnosti išlo o minimalizáciu spotreby energie.

4.5.4 Formulácia MPC

Matematická formulácia MPC riadenia je veľmi podobná formulácii LQR problému, avšak zahŕňa viaceré odlišnosti. Všeobecne pozostáva z účelovej funkcie (22), ktorej snahou je nájsť také vstupy, resp. akčné zásahy, ktoré budú minimalizovať celú sumu. MPC ďalej pozostáva z predikčnej rovnice (23), v ktorej podľa súčasného známeho stavu a známeho akčného zásahu dokážeme povedať, ako sa bude tento stav v ďalšom kroku, teda do budúcnosti vyvíjať. V LQR formulácii musí byť predikčná rovnica lineárna, pričom pri prediktívnom riadení môžeme uvažovať aj o nelineárnych alebo tzv. hybridných systémoch [15].

$$\min \sum_{k=0}^{N-1} s_k^T Q_s s_k + Q_u u_k \quad (22)$$

$$s. t. \ x_{k+1} = Ax_k + Bu_k, \ x_0 = x(0) \quad (23)$$

$$y_k = Cx_k + Du_k \quad (24)$$

$$y_{ref} - tol \leq y_k \leq y_{ref} + tol \quad (25)$$

$$u_{min} \leq u_k \leq u_{max} \quad (26)$$

Dôležitým faktorom formulácie účelovej funkcie je tzv. predikčný horizont N . Znamená to, že sa na správanie systému pozeráme od terajšieho stavu (času 0) až do konečného času, ktorý reprezentuje predikčný horizont N , pričom zo všetkých možných priebehov v tomto predikčnom horizonte vyberieme ten, ktorý minimalizuje účelovú funkciu. O predikčnom horizonte môžeme povedať, že čím dlhší tento časový interval je, tým kvalitnejšie riadenie vieme dosiahnuť. Zároveň tiež platí, že kým pri LQR riadení býva suma v účelovej funkcii nekonečnou predikciou správania sa daného systému, drvivá väčšina prediktívneho riadenia je implementovaná na konečnom predikčnom horizonte.

Ďalšou z charakteristických črt MPC riadenia je časový rámec pre veličiny meniace sa v čase. Kým pri LQR formulácii zvykne byť systém opísaný v spojitom alebo diskretnom čase, pri prediktívnom riadení ide vo väčšine prípadov o diskretný časový rámec. Do systému teda zavádzame periódu vzorkovania a následne sa na predikciu pozeráme ako na násobok tejto periódy. Znamená to, že ak by sme mali predikciu 24 hodín s periódou vzorkovania 1 hodina, pri prediktívnom riadení by sme povedali, že sa ideme pozrieť na predikciu nasledovných 24 krokov, ktoré tak tvoria predikčný horizont.

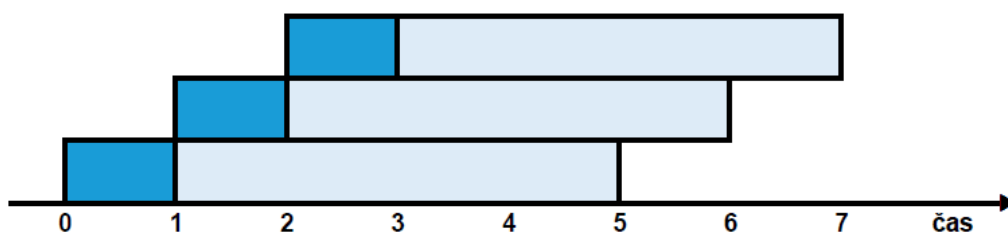
Najdôležitejším rozdielom medzi LQR a MPC riadením je možnosť uvažovať pri prediktívnom riadení s tzv. procesnými ohraničeniami, ktoré predstavujú tú najvýznamnejšiu odlišnosť od LQR riadenia. Prediktívne riadenie dokáže vďaka garancii splnenia ohraničení generovať akčné zásahy, ktoré dokážu spĺňať kvalitatívne kritériá kladené na ostatné premenné. Zavedenie ohraničení (24)-(26) a ich matematickú formuláciu vysvetlíme neskôr pri implementácii MPC riadenia pre náš matematický model inteligentnej miestnosti.

4.5.5 Posuvný horizont

Pri riadení systému sa často stáva, že jeho reálna dynamika nie vždy korešponduje s predpokladaným správaním sa. K tomuto javu dochádza vplyvom nepredvídaných situácií, pôsobením poruchových veličín alebo vplyvom odchýlok správania sa modelu od reálnej situácie. Na to, aby sme eliminovali odchýlky predpokladaného modelového správania sa systému od jeho skutočného správania, zavádzame do systému spätnú väzbu.

Pri prediktívnom riadení má princíp spätnej väzby svoje špecifiká. Ak by sme vypočítali optimálne akčné zásahy pre celý predikčný horizont a spätnú väzbu by sme realizovali až v jeho závere, mohli by sme sa dopustiť veľmi veľkej odchýlky od reálneho správania sa systému, ktorá by v niektorých prípadoch riadených systémov mohla mať až tragické následky. Preto sa spätná väzba zavádza nasledovným spôsobom. Na začiatku MPC regulátor zistí aktuálne hodnoty stavových premenných a vypočíta hodnoty optimálnych akčných zásahov na N krokov do budúcnosti (celý predikčný horizont). Následne však realizuje iba prvý krok optimálneho plánu a implementuje ho do systému. V ďalšej perióde vzorkovania meraním získa nové hodnoty stavových premenných a opäť optimalizuje akčné zásahy pre N krokov do budúcnosti, pričom do systému implementuje opäť iba prvý krok tohto plánu. Opakovaním tohto postupu sa pokračuje ďalej, čím sa aplikuje prediktívne riadenie v uzavretej slučke [14].

Pre lepšiu ilustráciu je v nasledovnom obrázku na časovej osi schematicky znázornené zavedenie spätnej väzby optimalizáciou akčného zásahu pre predikčný horizont $N = 5$ krokov, pričom sa realizuje vždy len prvý z nich.



Obr. 13: Schematické znázornenie posuvného horizontu

5 Návrh riadenia

Na základe teoretických poznatkov, ktoré sme získali štúdiom viacerých prístupov k riadeniu systému, sme sa v ďalšom kroku snažili implementovať štyri rôzne typy regulátorov, simulačne overiť priebeh a funkčnosť riadenia a následne urobiť analýzu a porovnanie kvality riadenia vzhľadom k vopred stanoveným požiadavkám na riadený systém, ktoré sú spomenuté v podkapitole 4.1.

5.1 ON-OFF implementácia

Najjednoduchší spôsob riadenia predstavuje ON-OFF alebo tzv. bang-bang regulátor. Do už existujúceho stavového opisu, ktorého implementovanie sme popísali v podkapitole 3.3, sme sa snažili pridávať, resp. modifikovať niektoré časti uzavretej slučky tak, aby bol dosiahnutý jeden z cieľov riadenia – dosiahnutie hodnôt vnútornej teploty v miestnosti, ktoré sa mali nachádzať v intervale od 21,5 do 22,5 °C. Väčšinu zmien sme vykonali v tzv. *for*-slučke v skripte MATLAB-u, prípadne v inicializácii niektorých hodnôt.

Ako prvú sme si zaviedli referenčnú teplotu a tiež tzv. delta okolie, teda interval, v ktorom sa ešte výstupná teplota môže nachádzať, v našom prípade $\pm 0,5$ °C. Následne sme si zadefinovali prázdne vektory, ktoré sa v priebehu *for*-cyklu naplňali hodnotami a tiež interval s počtom simulačných krokov. (Pre jednotnosť podmienok pre všetky regulátory a neskoršiu objektívnu analýzu prístupov k riadeniu, sme sa rozhodli stanoviť počet simulačných krokov rovný 600, čo predstavuje dobu jedného celého dňa.)

```
% simulacne kroky
Nsim = 600;
% ON/OFF regulator
w = 22;
delta = 0.5;
% vektory
X = x0;
Y = [];
U = [];
P = [];
W = [];
LB = [];
UB = [];
```

```
time = 1:Nsim;
```

Keďže sme chceli neskôr vyhodnocovať, v akej miere sa riadená veličina bude nachádzať v požadovanom intervale vzhľadom na počet simulačných krokov, zaviedli sme do systému aj počítadlo tých krokov, v ktorých teplota daný interval „neopustí“. Na začiatku bola hodnota počítadla inicializovaná na nulu.

Následne sme už do *for*-slučky mohli zakomponovať jednoduchý algoritmus, ktorý v každom kroku vyhodnocoval či sa sledovaná veličina (teplota v miestnosti) nachádza v intervale $(w - \text{delta}, w + \text{delta})$. Podľa tohto vyhodnotenia sa následne kúrenie v miestnosti (náš akčný zásah), buď zapol (poloha ON) alebo vypol (poloha OFF), čo je podstatou bang-bang regulátora.

Za *for*-slučkou sme na záver uviedli dva jednoduché príkazy, z ktorých prvý percentuálne vyhodnocoval tepelný komfort v miestnosti (v akej miere bola výstupná veličina súčasťou zvoleného intervalu) a druhý v sume všetkých akčných zásahov počas simulačného času určil celkovú spotrebu energie potrebnú na vykurovanie miestnosti.

```
% pocitadlo krokov kde t je v intervale
counter = 0;

for i=1:Nsim

    x0 = X(:,end);
    % system
    xkn = Ad*x0 + Bd*u0 + Ed*p0(:,i);
    yk = Cd*x0 + Dd*u0;
    % ON/OFF regulator
    lb = w - delta;
    ub = w + delta;

    if yk < lb
        u0 = 5000;
    end

    if yk > ub
        u0 = 0;
    end

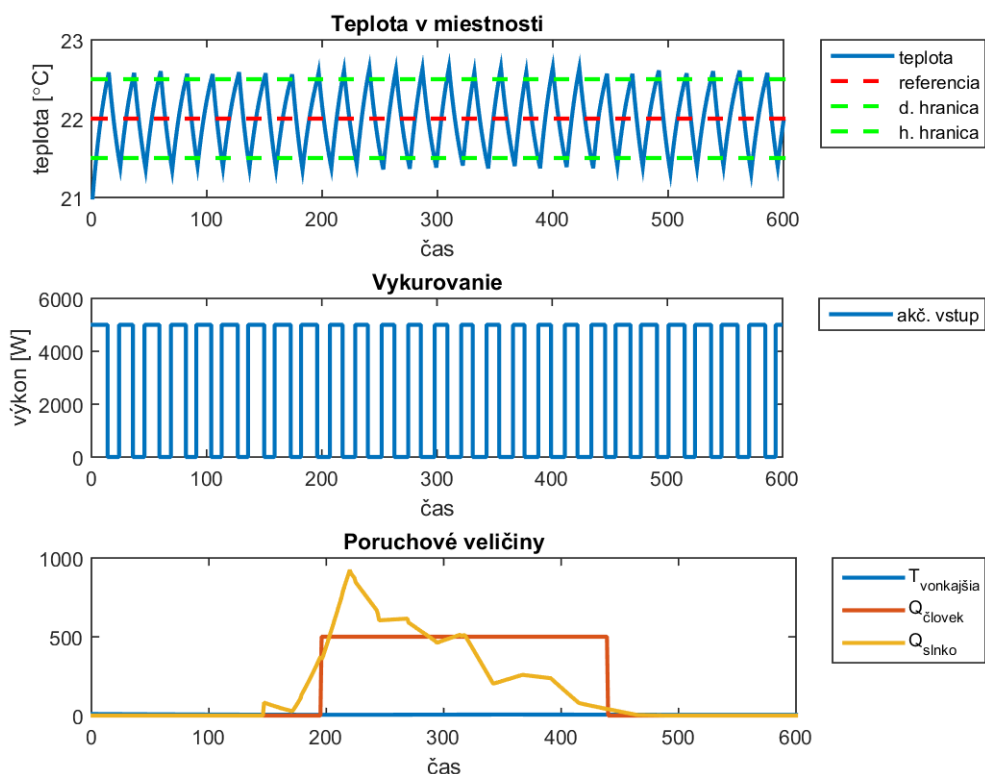
    if yk > ub | yk < lb
        counter = counter + 1;
    end

    x0 = xkn;

    X = [X, xkn];
    Y = [Y, yk];
    U = [U, u0];
    P = [P, p0(:,i)];
    W = [W, w];
    LB = [LB, lb];
    UB = [UB, ub];
end

% komfort
com_onoff = 100-(counter*100)/Nsim;
% spotreba energie
energy_onoff = sum(U);
```

Pre vykreslenie dynamiky systému, jeho riadenia ON-OFF regulátorom a neskoršie vyhodnocovanie sme využili grafické znázornenie:



Obr. 14: Riadenie systému ON-OFF regulátorom

Vďaka implementovaným príkazom na výpočet tepelného komfortu a celkovej spotreby energie sme po odsimulovaní dynamiky systému dostali pre periódu jedného dňa nasledovné hodnoty:

- Percentuálne vyjadrenie tepelného komfortu: **80,5 %**
- Celková spotreba energie na vykurovanie: **1650 kW**

5.2 PID implementácia

5.2.1 Regulácia na setpoint

Pri návrhu PID regulátora sme takisto modifikovali uzavretú slučku v skripte podľa teoretických znalostí o tomto spôsobe riadenia. Okrem samotnej implementácie v kóde je najdôležitejšou časťou nájdenie vhodných koeficientov proporčnej, integrálnej a derivačnej zložky regulátora. Tento tzv. tuning sme realizovali najprv ručným ladením a neskôr aj využitím nástroja *pidTuner*, ktorý beží pod MATLAB-om. V nasledujúcej implementácii uvádzame najlepšie hodnoty parametrov, ku ktorým sme sa využitím uvedených metód dopracovali.

Ako prvé sme si teda v kóde inicializovali hodnoty parametrov P , I , D , referenčnú teplotu w a regulačnú odchýlku e ako aj jej sumáciu. Opäť sme si vytvorili aj prázdne vektory, ktoré sa v neskoršom priebehu simulácie naplňali hodnotami:

```
% PID regulator
Pro = 5000;
Int = 1000;
Der = 0;
w = 22;
delta = 0.5;
e0 = 0;
sum_e = 0;

% vektory
X = x0;
Y = [];
U = [];
P = [];
W = [];
LB = [];
UB = [];
```

Vo *for*-slučke sme okrem dynamiky systému zadefinovali regulačnú odchýlku ako rozdiel referencie a skutočnej výstupnej hodnoty v systéme v danom simulačnom kroku. Zároveň sme uviedli sumu regulačných odchýlok pre potreby I -zložky regulátora a diferenciu regulačnej odchýlky ako rozdiel jej hodnoty v aktuálnom a predchádzajúcom kroku. Takto zadefinovanú diferenciu sme potrebovali pre D -zložku regulátora, ako to vyplýva z teoretických poznatkov. Následne sme už mohli zaviesť rovnicu vyjadrujúcu závislosť vstupnej veličiny (akčného zásahu) od jednotlivých zložiek regulátora a príkazy pre zápis údajov do vopred zadefinovaných prázdnych vektorov.

```
for i=1:Nsim

    x0 = X(:,end);

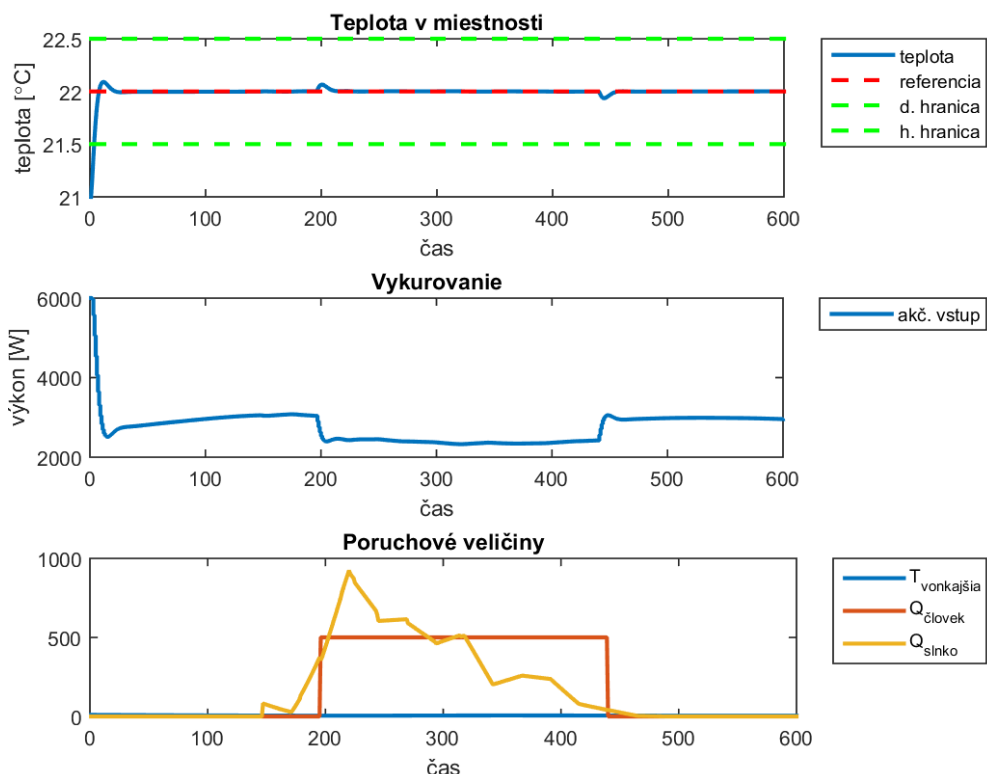
    % system
    xkn = Ad*x0 + Bd*u0 + Ed*p0(:,i);
    yk = Cd*x0 + Dd*u0;
    % PID regulator
    e = w - yk;
    sum_e = sum_e + e;
    dif_e = e-e0;
    u = Pro*e + Int*(sum_e) + Der*(dif_e);
    u0 = u;
    e0 = e;
    x0 = xkn;

    lb = w - delta;
    ub = w + delta;

    X = [X, xkn];
    Y = [Y, yk];
    U = [U, u0];
    P = [P, p0(:,i)];
    W = [W, w];
    LB = [LB, lb];
    UB = [UB, ub];

    if yk > ub | yk < lb
        counter = counter + 1;
    end
end
```


Následné vykreslenie časových priebehov vstupných, výstupných a poruchových veličín po implementácii PID regulátora do systému nám ilustruje úspešnosť riadenia.



Obr. 15: Riadenie systému PID regulátorom (referencia 22 °C)

Aj pre tento typ regulátora sme simuláciou dynamiky systému dostali dôležité informácie o kvalite riadenia:

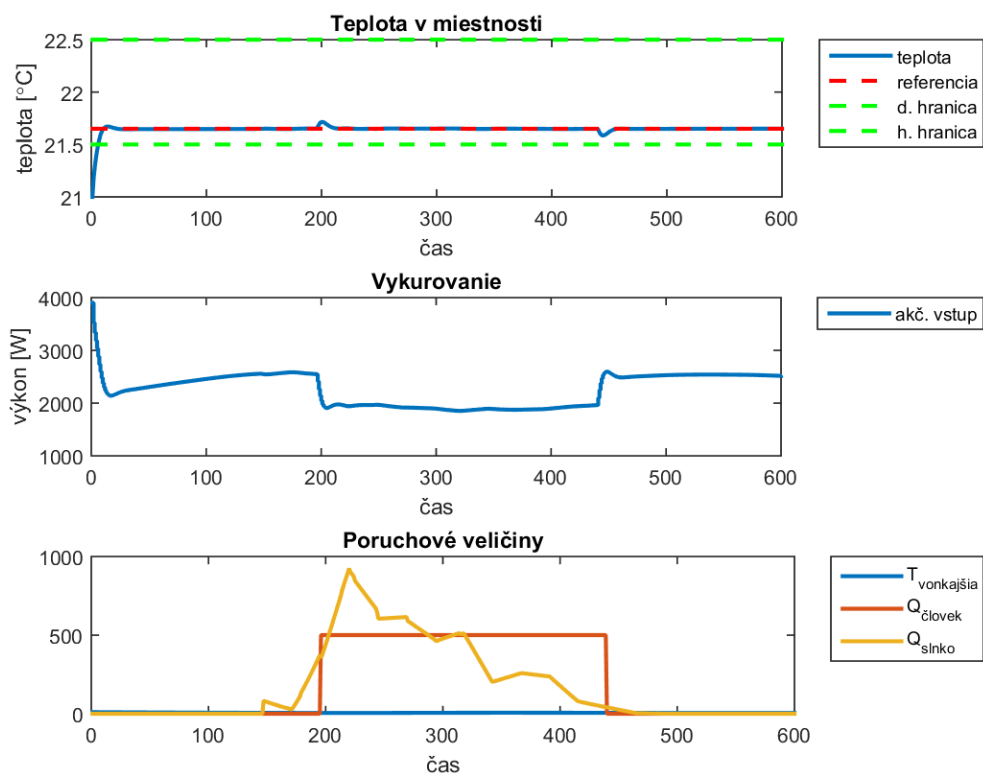
- Percentuálne vyjadrenie tepelného komfortu: **99,5 %**
- Celková spotreba energie na vykurovanie: **1647 kW**

5.2.2 Zónová regulácia

V predchádzajúcom prípade sme použitím integračnej zložky PID regulátora docielili, aby sa sledovaná hodnota teploty v miestnosti v každom simulačnom kroku (okrem nábehovej fázy a menších prekmitov) rovnala referenčnej hodnote 22 °C. Inými slovami, odstránili sme regulačnú odchýlku. Tento spôsob síce spĺňa požiadavku tepelného komfortu v miestnosti, avšak ako sme spomenuli v podkapitole 4.1, našim cieľom nebolo dosahovať referenčnú teplotu po celý čas, ale dovolili sme systému nachádzať sa v intervale teplôt 21,5 až 22,5 °C. Ak by sa nám podarilo regulovať teplotu v miestnosti takým spôsobom, aby jej hodnoty boli bližšie dolnej hranici teplotného

intervalu, splnili by sme prvú požiadavku riadenia systému a logicky by sme tým zároveň mohli dosiahnuť aj nižšiu spotrebu energie. Takýto typ riadenia by sme mohli nazvať zónovou reguláciou.

Na realizáciu tohto prístupu k riadeniu sme potrebovali upraviť hodnotu referencie, ktorú bude PID regulátor sledovať. S použitím rovnakých hodnôt P , I , D parametrov a pri uvažovaní miernych prechodov výstupnej veličiny v dôsledku pôsobenia poruchových veličín sme stanovili novú hodnotu referencie na $21,65\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zvyšné časti simulačného skriptu ostali nezmenené. Výslednú dynamiku takto regulovaného systému možno vidieť v grafickom znázornení.



Obr. 16: Riadenie systému PID regulátorom (referencia $21,65\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Dôležitou informáciou o kvalite riadenia sú nasledovné hodnoty získané výpočtom v simulačnom skripte:

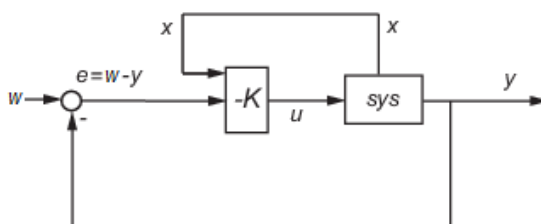
- Percentuálne vyjadrenie tepelného komfortu: **99,2 %**
- Celková spotreba energie na vykurovanie: **1353 kW**

Ukázalo sa, že naša úvaha o nižšej spotrebe energie pri zónovej regulácii PID regulátorom bola správna.

5.3 LQR implementácia

Pri zavedení LQR regulátora do systému riadenia inteligentnej miestnosti využijeme opäť dva prístupy.

5.3.1 Reference tracking (sledovanie referencie)



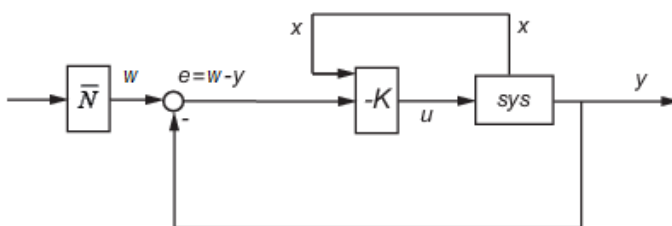
Obr. 17: Schematické znázornenie implementácie LQR riadenia s maticou zosilnenia K

Použitie lineárneho kvadratického regulátora v praxi predstavuje vygenerovanie najlepšieho zosilnenia reprezentovaného maticou K tak, aby spätná väzba $u_k = -Kx_k$ minimalizovala kvadratickú účelovú funkciu. K tomu potrebujeme definovať dva parametre – stavovú váhovú maticu Q a váhovú maticu vstupov R . Váhovanie súčinu stavov a vstupov v účelovej funkcii reprezentuje matica N . Často sa však vynecháva a v návrhu regulátora sa zvolí ako nulová matica. Je tiež veľmi dôležité dbať na správne rozmery jednotlivých matic [16].

V našom prípade sme pre jednoduchosť zvolili maticu R ako jednotkovú maticu a matica Q má tvar $pC'C$. Takto sme brali do úvahy iba tie stavy, ktoré definovali našu účelovú funkciu. Hodnotu váhového faktora p je možné modifikovať, čo bude mať za následok zmenu odozvy. Následne sme už mohli nájsť maticu K využitím príkazu `dlqr` v MATLAB-e. Váhový koeficient p v nasledujúcom skripte je už vyladený na optimálnu hodnotu:

```
% LQR regulator
nx = size(Ad,2);
ny = size(Cd,1);
nu = size(Bd,2);
Q = 241.3*1e6*Cd'*Cd;
R = 1*eye(nu);
N = zeros(nx,nu);
[K,S,e] = dlqr(Ad,Bd,Q,R,N);
```

Takýmto zavedením zosilnenia by sme systém síce uriadili, avšak dostali by sme stále dosť veľkú regulačnú odchýlku. Jedným zo spôsobov, ako sa to dá napraviť, je zaviesť tzv. prekompenzačný člen $\bar{N}$.



Obr. 18: Schéma LQR regulácie s prekompenzáciou

Na rozdiel od iných metód návrhov riadenia, tento systém neporovnáva výstup vzhľadom k referencii. Namiesto toho porovnáva všetky stavy násobené maticou K s referenciou. Preto by sme nemali očakávať, že sa požadovaný výstup bude rovnať zadanej referencii. Na získanie požadovanej výstupnej veličiny môžeme merať referenčný vstup tak, že výstup bude rovný referencii v rovnovážnom stave. To je možné vykonať práve zavedením prekompenzačného faktora $\bar{N}$. Navyše môžeme vhodným nastavením parametra p dosiahnuť podobný efekt ako pri zónovej PID regulácii – hodnotu teploty v miestnosti priblížiť k dolnej hranici teplotného intervalu a tým dosiahnuť nižšiu spotrebu energie. Takouto implementáciou sme do systému opisujúceho dynamiku miestnosti zaviedli LQR riadenie [16]:

```

Z = [zeros([1,nx]) nu];
Ninv = inv([Ad,Bd;Cd,Dd])*Z';
Nx = Ninv(1:nx);
Nu = Ninv(1+nx);
Nbar = Nu + K*Nx;

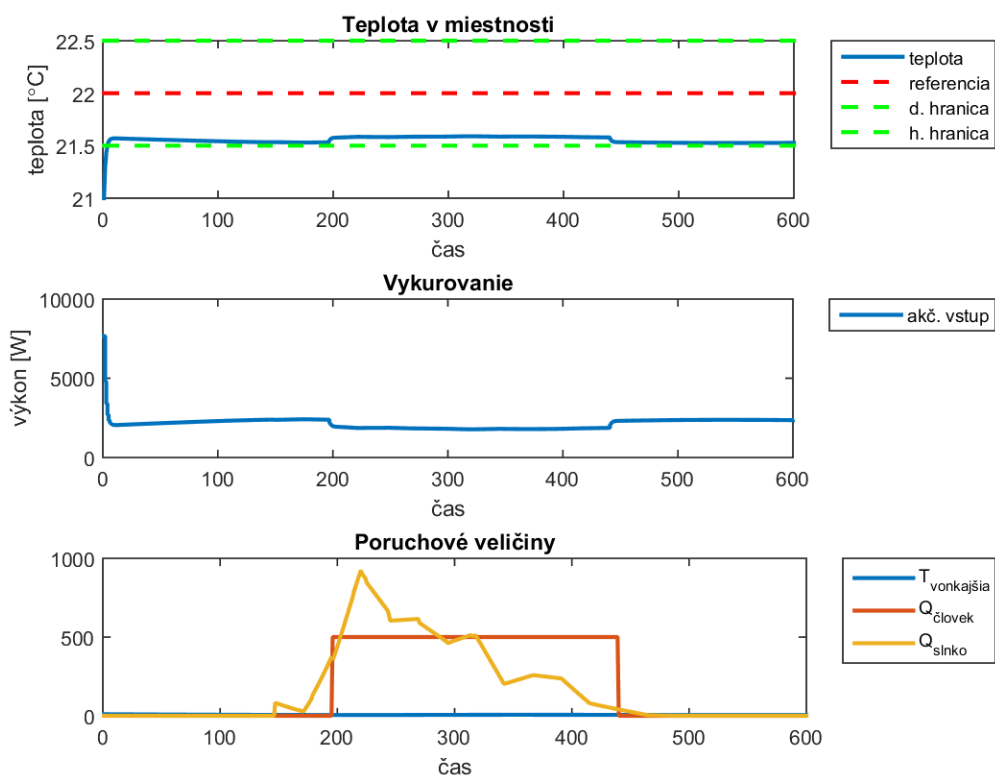
for i=1:Nsim

    x0 = X(:,end);
    % LQR regulator
    u0 = -Nbar*w(i)-K*x0;
    % system
    xkn = Ad*x0 + Bd*u0 + Ed*p0(:,i);
    yk = Cd*x0 + Dd*u0;

    X = [X, xkn];
    Y = [Y, yk];
    U = [U, u0];
    P = [P, p0(:,i)];
    W = [W, w];

    lb = w - delta;
    ub = w + delta;
    if yk > ub | yk < lb
        counter = counter + 1;
    end
end

```



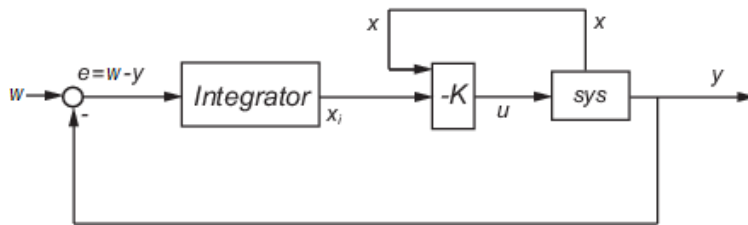
Obr. 19: Riadenie systému LQR regulátorom sledovaním referencie

Implementovaním tohto typu riadenia tepelného komfortu v miestnosti sme dosiahli nasledovnú kvalitu regulácie:

- Percentuálne vyjadrenie tepelného komfortu: **99,5 %**
- Celková spotreba energie na vykurovanie: **1279 kW**

5.3.2 Offset free (bez odchýlky)

Výpočet prekompenzačného člena $\bar{N}$ vychádza z modelu systému a zároveň je lokalizovaný mimo spätnoväzbovej uzavretej slučky. Z tohto dôvodu, ak sú v systéme nejaké chyby, resp. vplyvy poruchových veličín, prekompenzácia neodstráni regulačnú odchýlku. Môžeme ju však eliminovať pridaním integračného prvku.



Obr. 20: Schéma LQR riadenia s integračným členom

Aj v tomto prípade sme si zadefinovali matice Q , R a N . Použitím príkazu *lqi* sme si v MATLAB-e dokázali vypočítať optimálne zosilnenie dané maticou K v spätnej väzbe, ktorá má tvar $u = -K[x; x_i]$, kde x_i predstavuje výstup integračného člena. Tento riadiaci algoritmus zabezpečí, že výstupná veličina bude sledovať referenciu.

```
% LQR regulator
nx = size(Ad,2);
ny = size(Cd,1);
nu = size(Bd,2);
Q = 5e3*[zeros(1,nx) 1]'*[zeros(1,nx) 1];
R = 1*eye(nu);
N = zeros(nx+1,nu);
w = [22*ones(1,Nsim)];
lb = [21.5*ones(1,Nsim)];
ub = [22.5*ones(1,Nsim)];
sum_e = 2200;

% bez odchylky
[K,S,e] = lqi(model,Q,R,N);

% pocitadlo krokov kde t je v intervale
counter = 0;
delta = 0.5;

for i=1:Nsim

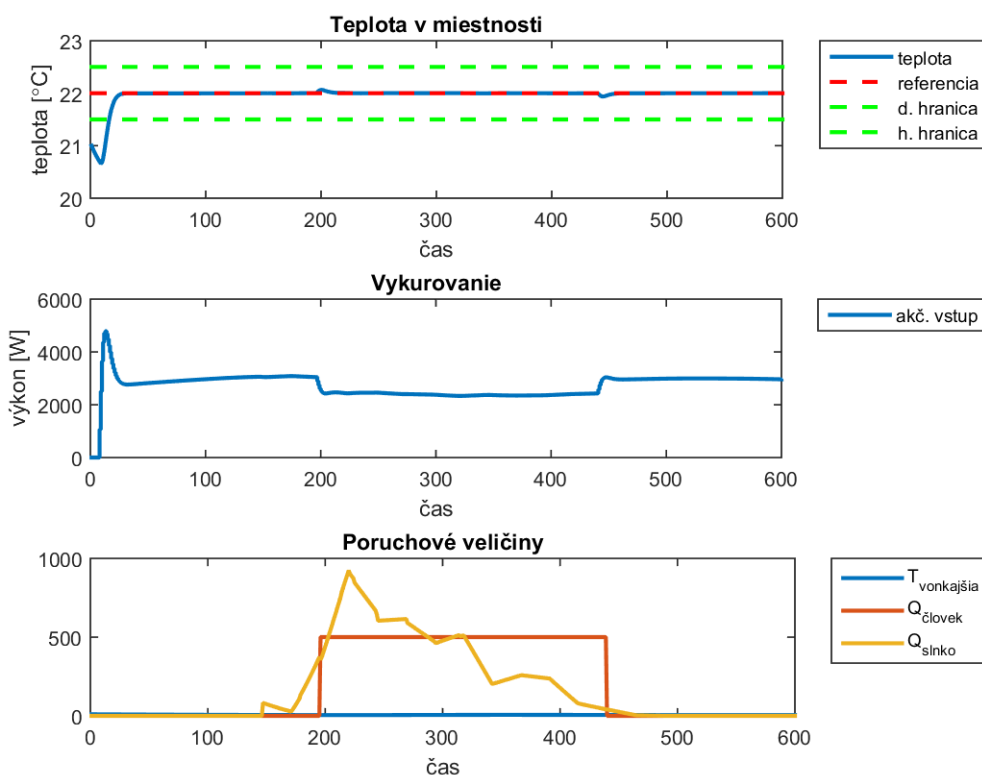
    x0 = X(:,end);
    % system
    xkn = Ad*x0 + Bd*u0 + Ed*p0(:,i);
    yk = Cd*x0 + Dd*u0;

    err = Ts*(w(i) - yk);
    sum_e = sum_e + err;
    % LQR regulator
    u0 = -K*[x0; sum_e];
    if u0 < 0
        u0 = 0;
    end

    X = [X, xkn];
    Y = [Y, yk];
    U = [U, u0];
    P = [P, p0(:,i)];
    E = [E, err];
    SE = [SE, sum_e];

    lb = w - delta;
    ub = w + delta;
    if yk > ub | yk < lb
        counter = counter + 1;
    end
end

end
```

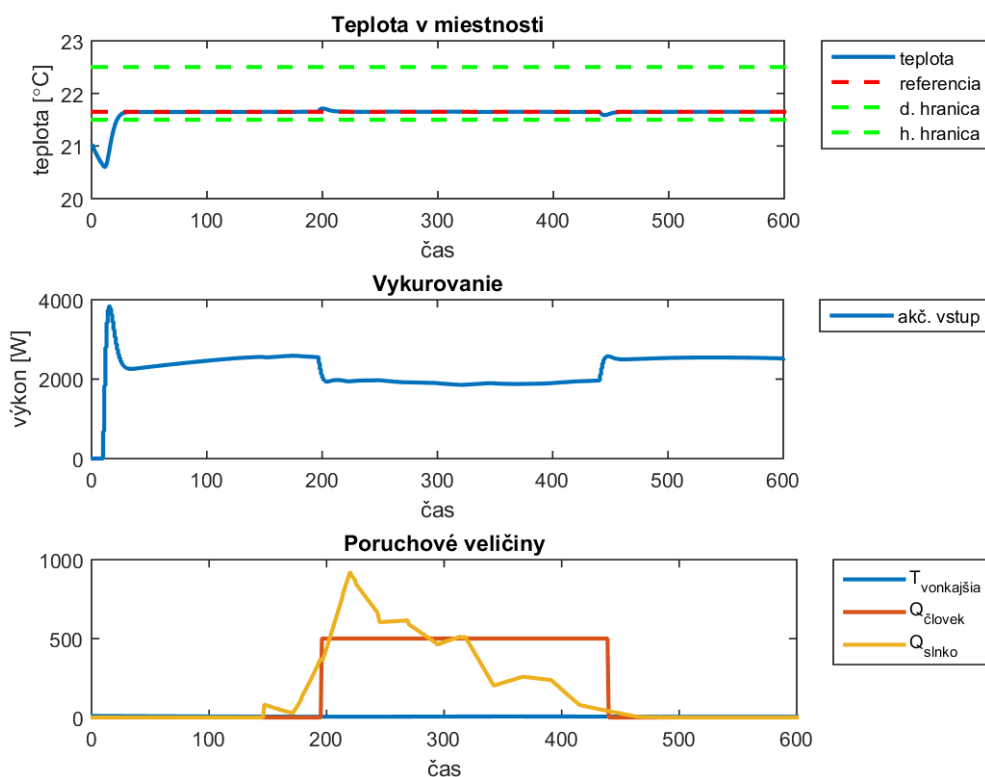


Obr. 21: Systém riadený LQR regulátorom s integračným členom (referencia 22 °C)

Opäť sa môžeme pozrieť aj na matematické vyjadrenie splnenia cieľov riadenia:

- Percentuálne vyjadrenie tepelného komfortu: **97,3 %**
- Celková spotreba energie na vykurovanie: **1632 kW**

Je vidieť, že spotreba energie v priebehu simulačného času vzrástla, čo je logické, keďže sme sa snažili o bezodchýlkové riadenie teploty v miestnosti na úrovni 22 °C. Aj v tomto prípade sme sa teda pokúsili spotrebu energie znížiť úpravou hodnoty referencie, ktorú sme nastavili mierne nad hodnotu dolnej hranice intervalu tepelného komfortu, a teda na 21,65 °C. Využili sme pritom schopnosť LQR regulátora s integrátorom riadiť náš systém bez regulačnej odchýlky. Výsledok takejto simulácie je možné vidieť v grafickej interpretácii.



Obr. 22: Systém riadený LQR regulátorom s integračným členom (referencia 21,65 °C)

Správnosť úvahy o nižšej spotrebe energie na vykurovanie miestnosti nám potvrdzuje simulačný výpočet implementovaný v skripte:

- Percentuálne vyjadrenie tepelného komfortu: **96,3 %**
- Celková spotreba energie na vykurovanie: **1341 kW**

5.4 MPC implementácia

Tak ako pri doterajších prístupoch k riadeniu, aj pri MPC regulácii bolo našou snahou riadiť teplotu v miestnosti tak, aby sa jej hodnota nachádzala v zóne tepelného komfortu a zároveň bola dosiahnutá minimálna spotreba energie na vykurovanie miestnosti.

5.4.1 Formulácia ohraničení

Dodržanie hodnoty teploty v zvolenom rozsahu je ekvivalentné splneniu nasledovného ohraničenia:

$$y_{ref} - tol \leq y_k \leq y_{ref} + tol \quad (27)$$

kde $tol > 0$ predstavuje pevnú šírku teplotného intervalu v našom prípade rovnú $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, čo reprezentuje akúsi hranicu ľudského vnímania tepelného komfortu. Už takáto samotná formulácia ohraničenia nám umožnila redukovať spotrebu energie, keďže sme od systému nepožadovali dodržiavať hodnotu referencie, ktorá sa nachádza v strede teplotného intervalu.

Zaviedli sme ďalšie ohraničenie, ktoré zahŕňa obmedzenie hodnoty akčného zásahu

$$u_{min} \leq u_k \leq u_{max} \quad (28)$$

kde u_{min} a u_{max} predstavujú minimálny a maximálny výkon vykurovacieho média, v našom prípade 0, resp. 5000 W.

Napokon sme k ohraničeniam pridali aj predikčnú rovnicu (29) a rovnicu výstupov (30) reprezentujúce stavový model systému

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \quad (29)$$

$$y_k = Cx_k + Du_k \quad (30)$$

5.4.2 Formulácia účelovej funkcie

Po zavedení ohraničení je druhým dôležitým krokom implementácie prediktívneho riadenia matematicky vyjadriť minimalizáciu spotreby energie. Túto úlohu môžeme chápať aj ako minimalizáciu funkcie obsahujúcej vstupné veličiny. Zvyčajne sa využíva minimalizácia štvorca vstupnej veličiny u^2 , ktorá priamo reprezentuje energiu konkrétneho toku. Keďže sme však v našom prípade uvažovali iba pozitívne hodnoty akčného zásahu (kúrenie), zaviedli sme do systému len samotnú minimalizáciu akčného zásahu u .

Vektor vstupov bol v každom kroku násobený váhovou maticou, ktorej funkciu vysvetlíme neskôr. Účelová funkcia tak nadobudla nasledovný tvar:

$$\min \sum_{k=0}^{N-1} Q_u u_k \quad (31)$$

5.4.3 Zmäkčenie ohraničení

Zavedenie tzv. tvrdých ohraničení nemusí vždy viesť k optimálnemu riešeniu alebo nevedie dokonca k žiadnemu. Aj pri implementácii prediktívneho riadenia sme potrebovali zmäkčiť ohraničenia, ktoré nám neskôr umožnili nájsť optimálne hodnoty akčných zásahov.

Zaviedli sme novú premennú $s_k \in R$ a zahrnuli sme ju do pôvodného ohraničenia (27) na hodnotu teploty v miestnosti:

$$y_{ref} - tol - s_k \leq y_k \leq y_{ref} + tol + s_k \quad (32)$$

Zároveň bola táto nová premenná novou veličinou, ktorej optimálnu hodnotu sme hľadali spolu s optimálnym akčným zásahom. Jej matematické vyjadrenie v účelovej funkcii spolu s váhovou maticou Q_s nadobudlo nasledovný tvar:

$$\min \sum_{k=0}^{N-1} s_k^T Q_s s_k + Q_u u_k \quad (33)$$

V praxi to znamená, že ak hodnota teploty v miestnosti spĺňala požiadavku danú ohraničením (27), hodnota zmäčkujúcej premennej s_k bola rovná nule. Na druhej strane, iba ak sa teplota dostala mimo teplotného intervalu, nadobúda s_k nenulovú hodnotu. Jednoducho povedané, ohraničenie (32) je mäkkou verziou ohraničenia (27). Takýmto spôsobom sme optimalizáciou účelovej funkcie (33) získali hodnoty akčných zásahov, ktoré udržiavali teplotu v miestnosti čo najbližšie teplotnej zóne.

5.4.4 Váhové matice

Dôležitou súčasťou účelovej funkcie sú váhové matice Q_s a Q_u . Ako je zrejmé z formulácie nášho optimalizačného problému, snažili sme sa naraz dosiahnuť dva protichodné ciele. Ak sme chceli dostať hodnotu teploty v miestnosti medzi hranice intervalu tepelného komfortu, potrebovali sme aktivovať kúrenie a teda zvyšovať hodnotu akčného zásahu. Na druhej strane bolo našou snahou minimalizovať spotrebu energie, čo sa dosiahne iba znižovaním výkonu vykurovacieho média. A práve preto sme do účelovej funkcie zaviedli tzv. váhové matice, ktoré mali za úlohu vyjadriť preferenciu dosiahnutia jednotlivých cieľov. Alebo povedané inak, snažili sme sa matematicky vyvážiť, do akej miery je pre nás dôležité dbať na dosiahnutie tepelného komfortu a do akej miery sa snažiť o minimálnu spotrebu energie.

5.4.5 Formulácia MPC v Yalmip-e

Po nadobudnutí všetkých doterajších teoretických poznatkov a formulácii optimalizačného problému sme implementovali MPC riadenie v skripte. Na realizáciu sme opäť využili softvérový nástroj MATLAB, v ktorom beží aj programový balík *Yalmip*. Pomocou neho sme mohli pomerne jednoducho formulovať optimalizačný problém zahŕňajúci účelovú funkciu, ohraničenia aj samotné riešenie problému.

Najprv sme si zaviedli minimálne a maximálne hodnoty vstupov a výstupov a predikčný horizont.

```
% ohranicenia
umin = [0];
umax = [5000];
ymin = [21.5];
ymax = [22.5];
% predikcny horizont
N = 10;
```

Nasledovala už samotná MPC formulácia s definíciou váhových matic, účelovej funkcie, ohraničení a všetkých stavových, vstupných a výstupných premenných pomocou funkcie *sdpvar*. Zároveň je počet predikovaných premenných priamo úmerný hodnote predikčného horizontu N .

```
% MPC definícia
nx = size(Ad, 2);
nu = size(Bd, 2);
ny = size(Cd, 1);

% vahove matice
Qu = [0.8e-4*eye(nu)];
Qs = 1e1;

tol = 0.5;

x = sdpvar(nx, N+1, 'full');
u = sdpvar(nu, N, 'full');
y = sdpvar(ny, N, 'full');
s = sdpvar(ny, N, 'full');
yref = sdpvar(ny, 1);

con = [];
obj = 0;
for k = 1:N
    con = con + [ x(:, k+1) == Ad*x(:, k) + Bd*u(:, k) ];
    con = con + [ y(:, k) == Cd*x(:, k) + Dd*u(:, k) ];
    con = con + [ umin <= u(:, k) <= umax ];
    con = con + [ yref-tol-s(:, k) <= y(:, k) <= yref+tol+s(:, k) ];

    obj = obj + s(:, k)'*Qs*s(:, k) + Qu*u(:, k);
end
options = sdpsettings('verbose', 0);
```

Nasledovala simulácia dynamiky systému v uzavretej slučke, ktorá je veľmi podobná simulačným zápisom predošlých regulátorov. V tejto uzavretej slučke však v každom kroku dochádza k výpočtu optimálnych premenných prostredníctvom balíka *Yalmip* a následne k ich aplikácii v rovniciach správania sa systému.

```
% pocet simulacnych krokov
Nsim = 600;

% pociatocne podmienky
x0 = [21; 21; 21; 21];
ref = 22;
p0 = poruchy(:, 1:Nsim);

% pre-kompilácia
opt = optimizer(con, obj, [], {x(:, 1), yref}, u);

Xsim = x0;
Usim = [];
Ysim = [];
Psim = [];
Ref = [];
LB = [];
UB = [];

% pocitadlo krokov kde t je v intervale
counter = 0;
```

```

% simulacia v uzavretej slucke
for k = 1:Nsim

    xt = Xsim(:, end);
    [u, problem, info] = opt({xt, ref});

    if problem~=0
        error(info{1});
    end

    uopt = value(u(:, 1));
    Usim = [Usim, uopt];

    xn = Ad*xt + Bd*uopt + Ed*p0(:,k);
    yn = Cd*xt + Dd*uopt;

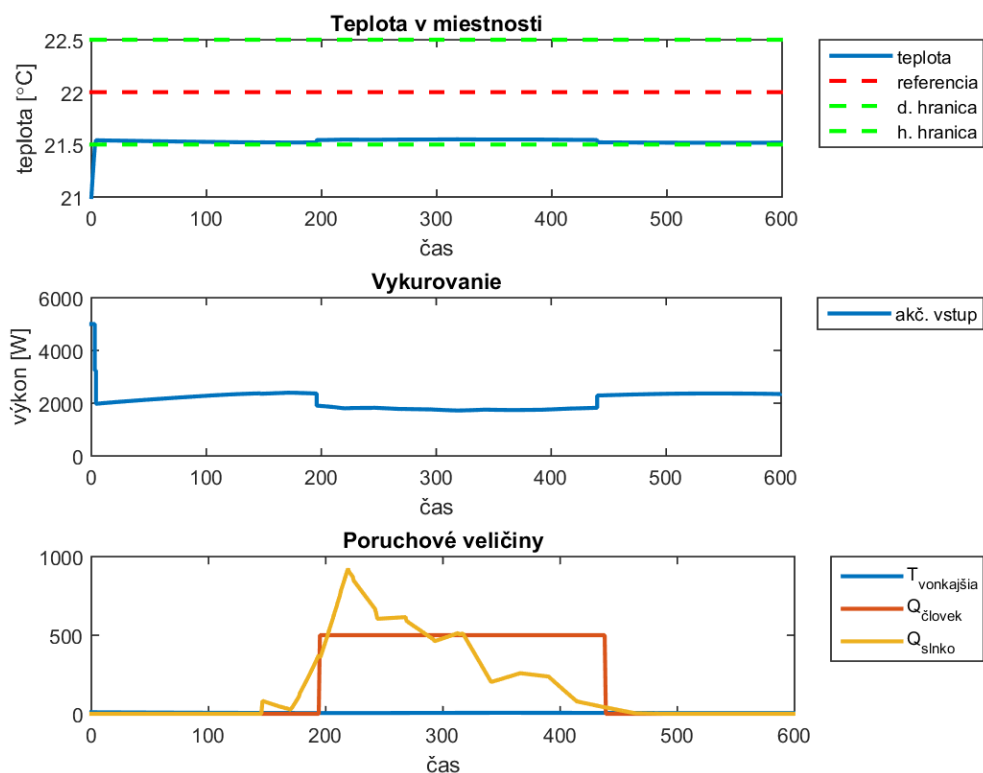
    lb = ref - tol;
    ub = ref + tol;

    Xsim = [Xsim, xn];
    Ysim = [Ysim, yn];
    Psim = [Psim, p0(:,k)];
    Ref = [Ref, ref];
    LB = [LB, lb];
    UB = [UB, ub];

    if yn > ub | yn < lb
        counter = counter + 1;
    end
end

```

Napokon už len ostávalo vykresliť grafický priebeh sledovaných veličín, vďaka ktorému sme sa mohli presvedčiť o splnení cieľov riadenia.

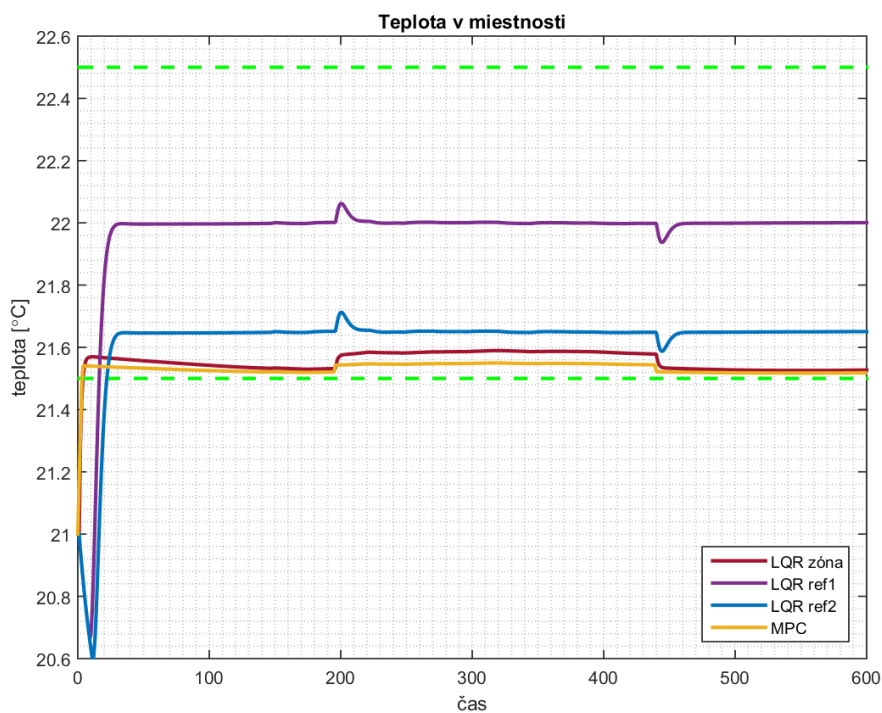


Obr. 23: Riadenie systému MPC regulátorom

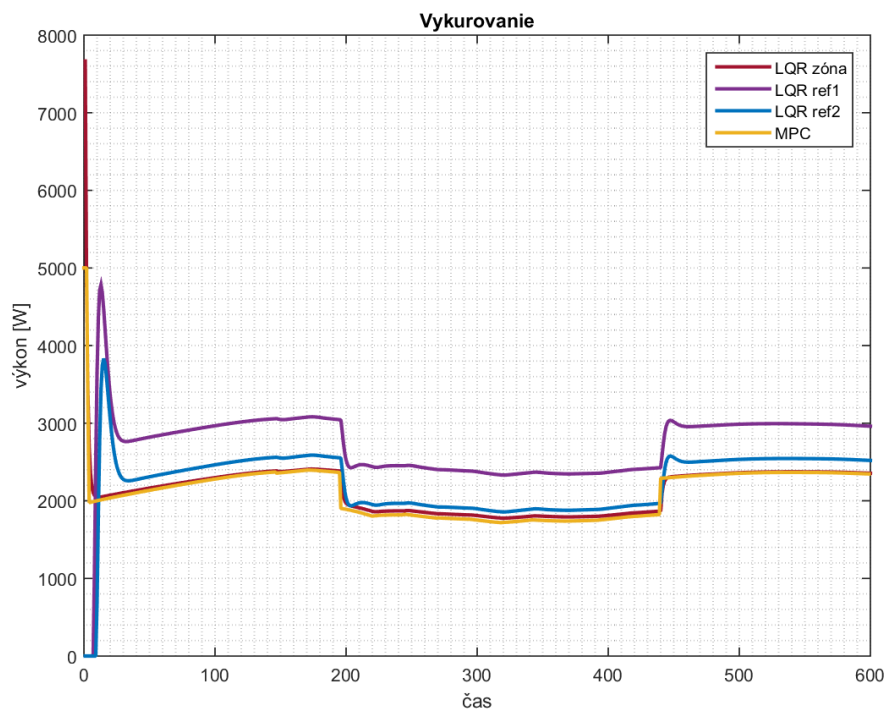
Aj do tohto simulačného skriptu sme zabudovali funkcie na výpočet percentuálnej miery splnenia tepelného komfortu a na výpočet spotreby energie na vykurovanie počas celej doby simulácie, ktorá predstavovala jeden deň. Prediktívne riadenie nám dokázalo garantovať ciele riadenia nasledovne:

- Percentuálne vyjadrenie tepelného komfortu: **99,3 %**
- Celková spotreba energie na vykurovanie: **1259 kW**

Pre lepšiu ilustráciu dynamiky systému po zavedení regulátorov z oblasti optimálneho riadenia (LQR a MPC) sme sa rozhodli v jednom grafe vykresliť časové priebehy akčných zásahov aj výstupnej veličiny pre všetky štyri optimálne prístupy, ktoré boli implementované. V nasledujúcich grafoch je vidieť rozdiel medzi jednotlivými riadiacimi stratégiami:



Obr. 24: Časové priebehy výstupnej veličiny pre regulátory z optimálnej oblasti riadenia



Obr. 25: Časové priebehy akčných zásahov pre regulátory z optimálnej oblasti riadenia

6 Analýza navrhnutých regulátorov

V predchádzajúcej kapitole sme na základe poznatkov z teórie riadenia uviedli štyri typy regulátorov, ktoré riadili model inteligentnej miestnosti s cieľom splniť dve hlavné požiadavky na kvalitu riadenia – udržanie tepelného komfortu v miestnosti a minimalizáciu spotreby energie využitej na vykurovanie. Z priebehu simulácií a vyhodnotenia sledovaných cieľov riadenia môžeme povedať, že každý z implementovaných návrhov riadenia ovplyvnil dynamiku systému takým spôsobom, že teplota v miestnosti vo veľkej miere dosahovala hodnoty z intervalu tepelného komfortu. Môžeme sa však teraz bližšie pozrieť na dve kritériá, na základe ktorých môžeme zhodnotiť úspešnosť či efektívnosť riadenia a navzájom ju porovnať.

6.1 Dosiahnutie tepelného komfortu

Ako bolo spomenuté v podkapitole 4.1, našim prvým cieľom bolo riadiť daný systém tak, aby sa teplota v miestnosti nachádzala v oblasti tzv. komfortnej zóny, ktorá predstavuje interval teplôt od 21,5 do 22,5 °C.

Pri návrhu ON-OFF riadenia sú v grafe (Obr. 14) znázornené zelené línie ohraničujúce práve interval komfortnej zóny. Teplota v miestnosti neustále kmitala okolo referenčnej hodnoty 22 °C, pričom zakaždým mierne presiahla hranice intervalu. Tieto tzv. prekmity boli spôsobené nepretržitým zapínaním a vypínaním kúrenia, na ktoré sa regulátor zo svojej podstaty nevedel dopredu pripraviť a zareagoval zmenou akčného zásahu až vtedy, keď už teplota v miestnosti nespĺňala podmienku teplotného intervalu. Inak povedané, prekmity boli spôsobené oneskorením zásahu akčného člena do systému oproti dynamike systému. Ak vykurovacie médium bolo nastavené na maximálny výkon (5000 W), teplota v miestnosti sa postupne zvyšovala, až dosiahla teplotu 22,5 °C. V tomto momente systém zaregistroval dosiahnutie hornej povolenej hranice a regulátor vyslal signál na úplné vypnutie kúrenia. Kým sa však tento akčný zásah uskutočnil, teplota v miestnosti ešte mierne stúpala. Tento efekt analogicky nastal aj pri dosiahnutí spodnej hranice intervalu. Grafický priebeh sledovanej veličiny napokon potvrdil aj údaj, ktorý sme dostali ako číselné vyjadrenie funkcie na výpočet percentuálnej miery tepelného komfortu. ON-OFF regulátor spĺňal požiadavku komfortnej zóny na 80,5 %. V tejto hodnote je zahrnutá nábehová fáza, v ktorej sa teplota v miestnosti musela dostať zo svojej počiatočnej hodnoty 21 °C na spodnú hranicu komfortnej zóny. Avšak veľký podiel na tomto čísle majú práve oneskorenia akčného zásahu na dynamiku systému graficky viditeľnú vo forme prekmitov.

Aj keď výsledok bang-bang riadenia môže byť pre nás uspokojivý, oveľa úspešnejší sme boli pri návrhu a implementácii PID regulátora. Keďže našim cieľom bolo dosahovať hodnotu teploty

v hraniciach komfortnej zóny, na porovnanie s ostatnými typmi regulátorov vyberáme práve ten typ PID regulátora, v ktorom sme sa snažili o tzv. zónovú reguláciu. Napokon tento spôsob riadenia dosahoval v porovnaní s reguláciou na setpoint výrazne lepšie výsledky. Z časového priebehu teploty v miestnosti (Obr. 16) môžeme vidieť, že okrem nábehu systému na začiatku regulačného procesu teplota vôbec neopustila interval komfortnej zóny. S malými prechodmi, ktoré boli z grafickej interpretácie spôsobené príchodom a následným odchodom človeka z miestnosti (vplyv poruchovej veličiny), sa systém svojou sledovanou veličinou držal hodnoty 21,65 °C nachádzajúcej sa v blízkosti dolnej hranice komfortnej zóny. Takýto výsledok riadenia sme dosiahli predovšetkým vďaka prítomnosti integračnej zložky PID regulátora, ktorá úplne eliminuje regulačnú odchýlku. Percentuálne vyjadrenie splnenia tepelného komfortu predstavovalo 99,2 %. Môžeme preto povedať, že PID regulátorom sa nám podarilo úspešne riadiť systém vzhľadom na dodržanie komfortnej zóny.

Pri LQR regulátore sme dosiahli porovnateľné výsledky. Na porovnanie s ostatnými regulátormi sme opäť vybrali ten spôsob implementácie LQR riadenia, ktorý dosahoval najlepšie hodnoty ukazovateľov kvality riadenia. Bol ním LQR s prekompenzáciou, pri ktorom sme vhodným nastavením hodnoty váhovej matice Q zabezpečili splnenie požiadaviek zónovej regulácie. Aj v tomto prípade sa hodnota teploty v miestnosti s výnimkou nábehovej fázy nachádzala v určenom teplotnom intervale, čo možno vidieť v grafickom znázornení dynamiky systému (Obr. 19). Tento prístup k riadeniu zabezpečil tepelný komfort na 99,5 % z celkovej dĺžky simulačného času. Len pre porovnanie – variant LQR regulátora s integračným členom kvôli dlhšej nábehovej fáze dokázal spĺňať hranice tepelného komfortu len na 96,3 % (navyše s vyššou spotrebou energie).

MPC regulátor v porovnaní so svojimi predchádzajúcimi konkurentmi dosiahol podľa očakávaní tiež výborné výsledky. Vyladením váhových matic Q_s a Q_u a následným riešením optimalizačného problému prostredníctvom balíka *Yalmip* sme dokázali udržiavať teplotu v miestnosti v intervale komfortnej zóny. V grafe (Obr. 23) môžeme opäť vidieť nábehovú fázu systému, po ktorej sa už teplota nachádza v požadovanom teplotnom intervale navyše veľmi blízko jeho dolnej hranice, čo bude mať za následok zníženie spotrebovanej energie, ako to neskôr bude možné vidieť.

Z porovnania percentuálnej miery tepelného komfortu je s výnimkou ON-OFF regulátora jasne vidieť, že regulátory dokázali splniť prvý cieľ riadenia s vysokou úspešnosťou. Od dosiahnutia 100%-ného komfortu ich zväčša oddeľovala iba nábehová fáza systému, pričom dosiahnuté percentuálne hodnoty komfortnej zóny sú približne rovnaké. Práve preto bude mať rozhodujúce slovo v porovnaní kvality jednotlivých prístupov k riadeniu celková spotreba energie.

6.2 Energetické a ekonomické hľadisko

Kritérium spotreby energie a v praxi nepriamo aj finančných prostriedkov by sa dalo analyzovať detailnejšie a rozsiahlo. Do hry by vstúpili nielen náročnosť samotného návrhu riadenia, maximálny výkon kotla, efektívnosť regulátorov a čas regulácie, ale aj použité tepelno-izolačné materiály v miestnosti, zložitejšie energeticko-bilančné výpočty a mnohé iné dôležité faktory.

Ak sa však obmedzíme na simulačný návrh riadenia vykurovania miestnosti, môžeme poukázať aspoň na zopár faktov. Z praktického, ale aj ekonomického hľadiska (čo sa obstarávacích nákladov týka) je návrh a použitie ON-OFF regulátora určite najpriateľnejšou voľbou. Aj preto je tak často využívaný v rôznych spotrebičoch v domácnostiach. Ide o jednoduché riadenie, pri ktorom regulátor vpúšťa akčný zásah do systému úplne alebo vôbec. Má to však aj svoju negatívnu stránku, ktorá napríklad pri varnej kanvici až tak nevádi, pretože voda sa v nej zohreje za relatívne krátky čas a zariadenie sa opäť nejakú dobu nepoužíva. Ak sme však riadili vykurovanie miestnosti ON-OFF regulátorom, mohlo byť to byť pre reálny systém namáhavé. Aj graficky (Obr. 14) sme sa mohli presvedčiť, že systém často vypínal a zapínal kúrenie, čím sa prirodzene urýchľuje opotrebovanosť jednotlivých súčiastok. Navyše, ak sme zvolili pomerne úzky teplotný interval komfortnej zóny, v systéme dochádzalo k prekmitom a celková spotreba energie, keď kotol kúri na 100 % a potom je zase vypnutý, bola výrazne vyššia ako pri ostatných typoch regulátorov. Demonštruje to aj celkové množstvo energie spotrebovanej na vykurovanie miestnosti počas 24 hodín, ktoré sa v prípade bang-bang regulátora rovnalo hodnote 1650 kW.

Z tohto pohľadu bol systém vykurovania riadený PID regulátorom omnoho priateľnejší. Nevidíme v ňom žiadne výrazné skoky v časových priebehoch akčných zásahov, pričom teplota v miestnosti, ktorá sa v určitom čase dostala na istú hodnotu, sa už udržiavala takmer konštantná. Môžeme si tiež všimnúť, že hodnoty akčného zásahu sa pohybovali približne v intervale od 2000 do 3000 W (Obr. 16), čo je určite energeticky výhodnejšie ako prepínanie medzi plným a nulovým výkonom kotla. Potvrdila to aj celková spotreba energie, ktorá za celú dobu simulačného času dosiahla hodnotu 1353 kW.

LQR riadenie implementované v našom systéme splňalo tiež veľmi dobre požiadavku tepelného komfortu v miestnosti. Teplota sa nachádzala v dolnej časti stanoveného teplotného intervalu, čím sa dosiahla nižšia spotreba energie. Z vyhodnotenia kvality riadenia sme dostali hodnotu celkovej spotreby energie rovnú 1279 kW. Je však veľmi dôležité upozorniť na fakt, že práve pri implementácii LQR regulátora s prekompenzáciou dosiahli akčné zásahy počas nábehovej fázy hodnoty vyššie ako 5000 W (Obr. 19), čo bol maximálny výkon kotla definovaný v kapitole 3.2.3. Poukazuje to na fakt, že LQR regulátor síce svojou podstatou patrí už do oblasti optimálneho riadenia,

avšak jeho nevýhodou je neschopnosť vysporiadať sa pri riešení problému s technologickými alebo fyzikálnymi ohnamičeniami daného systému.

Akýmsi vrcholom v návrhu riadenia bol MPC regulátor. Tento prístup nám dokázal zabezpečiť teplotu v miestnosti v rozsahu komfortnej zóny a najlepšie zo všetkých regulátorov splnil podmienku minimalizácie spotrebovanej energie. Na vykurovanie miestnosti počas simulačného času, ktorý predstavoval jeden deň, predstavovala suma všetkých akčných zásahov do systému hodnotu 1259 kW. Čo je tiež dôležité a v porovnaní s LQR regulátorom radí prediktívne riadenie na čelo v oblasti kvality riadenia, je splnenie ohnamičení. Ako je možné vidieť v grafickom priebehu (Obr. 23) dynamiky systému riadeného MPC regulátorom, systém ani raz neporušil ohnamičenie na vstupy a zabezpečil, aby hodnota akčného zásahu nepresiahla maximálny výkon vykurovacieho média 5000 W.

Súhrn výsledných ukazovateľov kvality riadenia – splnenie komfortnej zóny a minimalizácia celkovej spotreby energie pre jednotlivé typy implementovaných regulátorov zhŕňa nasledujúca tabuľka:

Tabuľka 3: Splnenie cieľov riadenia jednotlivými typmi regulátorov

Regulátor	Komfort (%)	Spotreba energie (kW)
ON-OFF	80,5	1650
PID	99,2	1353
LQR	99,5	1279
MPC	99,3	1259

6.3 Konfrontácia dvoch najúspešnejších prístupov k riadeniu

Z hľadiska tepelného komfortu a celkovej spotreby energie dosahovali najlepšie výsledky dva typy regulátorov, oba z oblasti optimálneho riadenia – LQR a MPC. Rozhodli sme sa ich preto ešte podrobiť jednej simulácii, v ktorej sme uskutočnili skokovú zmenu referencie. Takýto prípad môže byť úplne bežný, pretože v praxi sa často stáva, že užívateľ si praje znížiť alebo zvýšiť teplotu v miestnosti. V jednej tretine simulačného času sme teda skokovo zmenili hodnotu referencie z 22 na 23 °C a následne v dvoch tretinách sme upravili referenciu opäť na pôvodnú hodnotu. Takáto zmena samozrejme priniesla aj zmenu hraníc tepelného komfortu a našou snahou bolo opäť dosiahnuť teplotu v miestnosti spĺňajúcu nároky komfortnej zóny pri čo najnižšej spotrebe energie na vykurovanie.

Na simulačné overenie tejto situácie sme urobili iba jednoduchú úpravu v už existujúcom skripte. Pre LQR regulátor sme pre hodnotu referencie a hornej a dolnej hranice intervalu nahradili časť kódu novým zápisom:

```
% skokova zmena
w = [22*ones(1,Nsim/3) 23*ones(1,Nsim/3) 22*ones(1,Nsim/3)];
lb = [21.5*ones(1,Nsim/3) 22.5*ones(1,Nsim/3) 21.5*ones(1,Nsim/3)];
ub = [22.5*ones(1,Nsim/3) 23.5*ones(1,Nsim/3) 22.5*ones(1,Nsim/3)];
```

Zároveň sme ale museli do skriptu zaviesť saturáciu akčných zásahov zdola na nulu, aby sme nepripustili záporné hodnoty vstupnej veličiny (chladenie) a aby tak podmienky pre porovnanie oboch prístupov boli rovnaké. V uzavretej slučke teda pribudla táto podmienka:

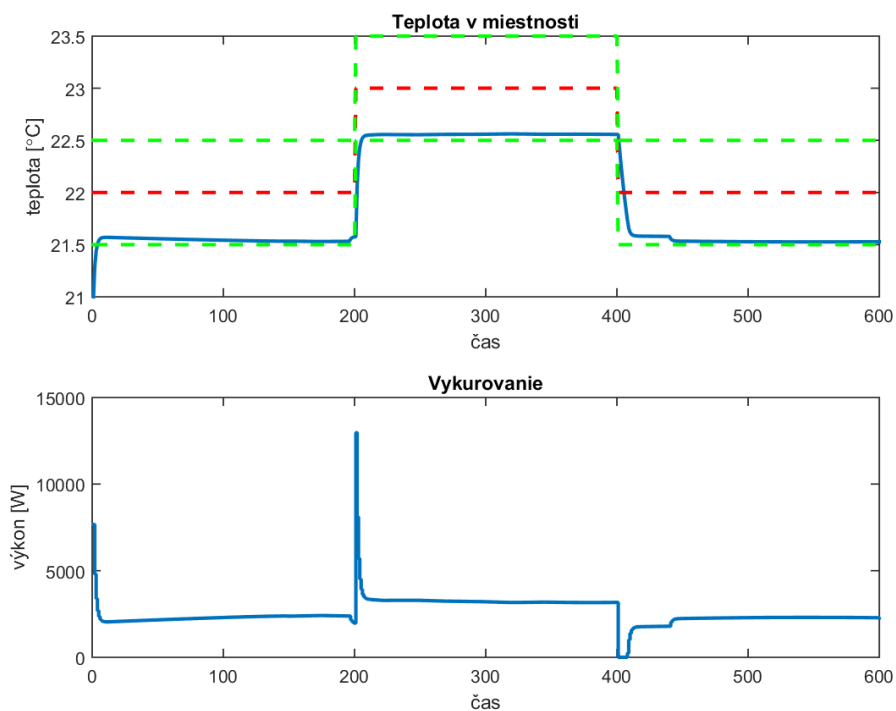
```
% saturacia akcných zasahov zdola na nulu
if u0 < 0
    u0 = 0;
end
```

Pre prediktívne riadenie sme zmenu museli urobiť vo formulácii uzavretej slučky pridaním nasledovnej sekcie:

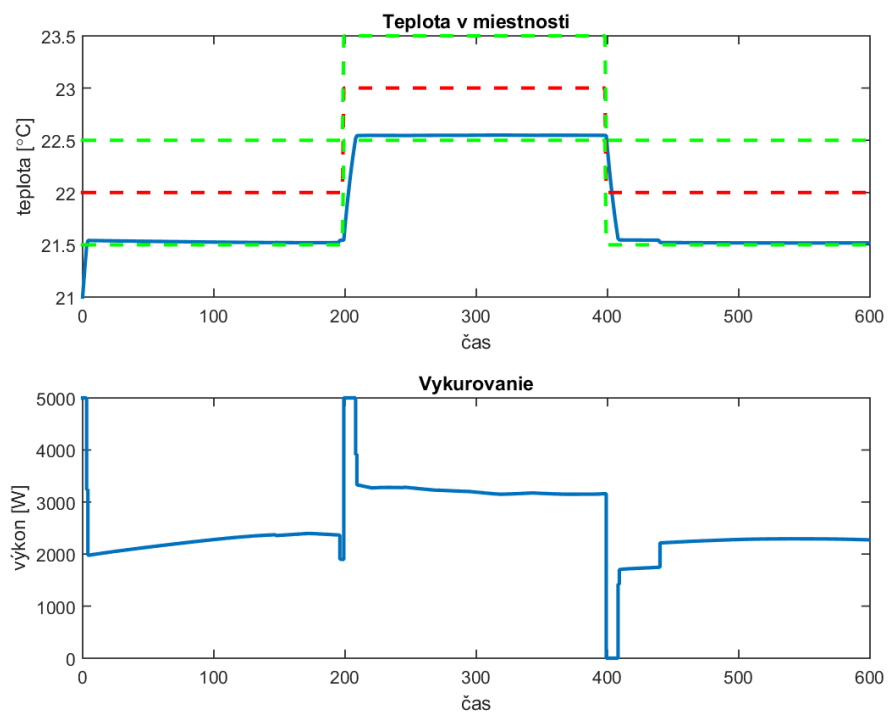
```
% skokova zmena
if k == 200
    ref = 23;
end

if k == 400
    ref = 22;
end
```

Nechali sme prebehnúť optimalizačné výpočty, odsimulovať dynamiky systému v uzavretej slučke a vykresliť časové priebehy sledovaných veličín:



Obr. 26: Skoková zmena referencie pri implementácii LQR riadenia



Obr. 27: Skoková zmena referencie pri implementácii MPC riadenia

Okrem grafickej interpretácie sme dosiahli aj nasledovné výsledky súvisiace s kvalitou riadenia:

Tabuľka 4: Splnenie cieľov riadenia jednotlivými typmi regulátorov

Regulátor	Komfort (%)	Spotreba energie (kW)	$u_{\max}$ (W)
LQR	99,5	1543	12971
MPC	97,7	1531	5000

Môžeme povedať, že so skokovou zmenou referencie sa oba regulátory vysporiadali veľmi dobre, pričom LQR riadil systém s vyššou percentuálnou mierou splnenia komfortnej zóny. Na druhej strane, prediktívne riadenie zabezpečilo o niečo nižšiu spotrebu energie na vykurovanie. Jednoduchým príkazom sme nechali vypočítať aj maximálnu hodnotu akčného zásahu, ktorý bol do systému v priebehu celej simulácie vpustený. Kým MPC riadenie striktnie dodržalo hodnotu maximálneho výkonu 5000 W, LQR regulátor vyslal do systému maximálny akčný zásah až 12971 W. Porušenie ohraničenia na vstupy vidieť aj z časového priebehu vstupnej veličiny pri LQR prístupe k riadeniu (Obr. 26).

Definitívne tak môžeme povedať, že MPC regulátor najlepšie splnil nároky na riadenie systému reprezentovaného matematickým modelom inteligentnej miestnosti. Zabezpečil vysokú mieru splnenia tepelného komfortu v miestnosti aj najnižšiu celkovú spotrebu energie využitej na vykurovanie. Navyše v porovnaní so svojim najväčším konkurentom z oblasti optimálneho riadenia dokázal splniť ohraničenia, ktoré boli kladené na hodnotu maximálneho aj minimálneho akčného zásahu do systému. Implementácia MPC regulátora do systému inteligentnej miestnosti potvrdila, že prediktívne riadenie spĺňa najvyššie kritériá na riadenie systémov a v konkurencii ostatných typov regulátorov je tým najvyspelejším prístupom k riadeniu.

7 Záver

Návrh riadenia inteligentnej miestnosti predstavoval komplexný problém, ktorý zahŕňal viacero dôležitých krokov. Prvoradým bol stavový opis systému a jeho implementácia v prostredí MATLAB-u, po ktorom sme sa už mohli oboznámiť s teoretickými princípmi viacerých typov regulátorov.

Každý zo štyroch prístupov k riadeniu predstavoval jedinečný návrh regulácie teploty v miestnosti. Ten pozostával z implementácie daného typu regulátora do simulačného skriptu, grafického vykreslenia časových priebehov vstupných, výstupných a poruchových veličín a následne z doladovania (tuningu) regulátora nastavovaním jeho vlastných parametrov. Všetky kroky smerovali k splneniu dvoch hlavných cieľov riadenia, ktorými boli zabezpečenie tepelného komfortu v miestnosti a súčasné dosiahnutie minimálnej spotreby energie potrebnej na vykurovanie.

Z hľadiska cieľov riadenia sme mohli konštatovať, že všetky štyri typy regulátorov boli navrhnuté a implementované do systému úspešne. Ich vzájomné odlišnosti bolo vidieť v presných vyjadreniach percentuálnej úspešnosti dodržania komfortnej zóny a množstva spotrebovanej energie. Dá sa povedať, že z tohto pohľadu rástla úspešnosť riadenia úmerne so zložitou návrhu a implementácie daného typu regulátora.

Oba najúspešnejšie prístupy k riadeniu (LQR a MPC) reprezentovali už oblasti optimálneho riadenia. Ich prednosťou bola schopnosť prispôbiť sa skokovej zmene referencie. Tá priamo ovplyvnila aj hranice teplotného intervalu, medzi ktorými sa mala nachádzať hodnota sledovanej teploty v miestnosti. A aj keď sa oba regulátory s touto zmenou vysporiadali veľmi dobre a ich výsledky boli porovnateľné, prediktívne riadenie v podobe MPC regulátora predsa vynikalo. Ako jediný spôsob riadenia spomedzi všetkých štyroch prístupov bolo totiž schopné vysporiadať sa s existenciou ohraničení na vstupné, výstupné aj stavové veličiny. V porovnaní s LQR nepresiahlo hornú a ani dolnú hranicu možného akčného zásahu, čo z neho spolu so splnenými cieľmi riadenia urobilo najlepší regulátor implementovaný do systému reprezentujúceho inteligentnú miestnosť.

Výsledky, ktoré vyplynuli z tejto práce, potvrdili, že prediktívne riadenie spĺňa najvyššie kritériá na reguláciu systémov a v súčasnosti je v konkurencii ďalších typov regulátorov tým najvyspelejším prístupom k riadeniu.

Do budúcnosti by bolo zaujímavé realizovať návrh a simulačné overenie regulátorov použitých v tejto práci aj na reálnom modeli inteligentnej miestnosti. Zaujímavým by bolo tiež rozšírenie objektu riadenia z jednej na viaceré veličiny, ako je to napríklad pri komplexnejších HVAC systémoch, pri ktorých je cieľom riadenia nielen vykurovanie, ale aj ventilácia v miestnosti a funkcia klimatizácie. V tomto smere táto práca predstavuje dobrý základ, na ktorom sa môžu vybudovať zložitejšie spôsoby riadenia inteligentných miestností či budov.

Zoznam použitej literatúry

- [1] DABBAGHIAN, V. *What Is Mathematical Modeling?* [online]. [cit. 2017-03-15]. Dostupné na internete: <<https://www.sfu.ca/~vdabbagh/Chap1-modeling.pdf>>
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Nonlinear_system
- [3] https://en.wikipedia.org/wiki/Control_theory#SISO_vs_MIMO
- [4] https://en.wikipedia.org/wiki/Discrete_time_and_continuous_time
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/State-space_representation
- [6] http://www.cds.caltech.edu/~murray/amwiki/index.php/System_Modeling
- [7] <http://www.senzorika.leteckafakulta.sk/?q=node/295>
- [8] https://en.wikipedia.org/wiki/Bang%E2%80%93bang_control
- [9] https://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller
- [10] https://en.wikipedia.org/wiki/Optimal_control
- [11] https://en.wikipedia.org/wiki/Linear%E2%80%93quadratic_regulator
- [12] MURRAY, R. M. *Control and Dynamical Systems*. [online]. 2006. [cit. 2017-04-03]. Dostupné na internete: <<http://www.cds.caltech.edu/~murray/courses/cds110/wi06/lqr.pdf>>
- [13] <http://www.mathworks.com/help/control/ref/dlqr.html?requestedDomain=www.mathworks.com>
- [14] KVASNICA, M. *Prednášky k predmetu prediktívne riadenie*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2017.
- [15] MACIEJOWSKI, J. M. *Predictive Control: with Constraints*. Harlow: Pearson Education, 2002. 331 s. ISBN 0-201-39823-0.
- [16] <http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=AircraftPitch§ion=ControlStateSpace#5>