



**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

Ing. Jozef Kurilla

Autoreferát dizertačnej práce

PRIADENIE VNÚTORNEHO PROSTREDIA BUDOVY S OBMEDZENIAMÍ

**na získanie akademického titulu
doktor (philosophiae doctor, PhD.)**

v doktorandskom študijnom programe
Automatizácia a riadenie

v študijnom odbore
5.2.14. automatizácia

Forma štúdia
Externá forma

Miesto a dátum
Bratislava 2017

Dizertačná práca bola vypracovaná

Na Ústave robotiky a kybernetiky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ikovičova 3, 812 19 Bratislava

Predkladateľ: Ing. Jozef Kurilla
Ústav robotiky a kybernetiky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ikovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: prof. Ing. Peter Hubinský, PhD.
Ústav robotiky a kybernetiky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ikovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: prof. Ing. Boris Rohal'-Ilkiv, CSc.
Ústav automatizácie, merania a aplikovanej informatiky
Strojnícka fakulta
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Námestie slobody 17, 812 31 Bratislava

doc. Ing. Libor Hargaš, PhD.
Katedra mechatroniky a elektroniky
Elektrotechnická fakulta
Žilinská univerzita v Žiline
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa:o.....h

Na Fakulte elektrotechniky a informatiky, STU
Ikovičova 3, 812 19 Bratislava,
v miestnosti

prof. Dr. Ing. Miloš Oravec
dekan fakulty
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Abstrakt

Cieľom práce je návrh realizovateľnej formy zónového riadenia vnútorného prostredia administratívnej budovy s ohľadom na technologické a hygienické obmedzenia rešpektujúc tepelný komfort užívateľov. Úvod práce sa venuje prehľadu súčasného stavu riadenia vetrania a klimatizácie a súvisiacim obmedzeniam. Využitiu genetických algoritmov pri hľadaní optimálnych parametrov zónových PI regulátorov v nasledujúcej časti práci predchádza ich aplikácia na riadenie potrubného ventilátora identifikovaného pomocou regresnej analýzy a simulačného prostredia. Práca využíva model mnohorozmerného systému - šiestich vzájomne susediacich kancelárií. Mnohorozmerný systém je odstránením vzájomných väzieb riadený ako šesť nezávislých systémov prvého rádu. Zónové PI regulátory s parametrami určenými genetickými algoritmi sú následne kvalitatívne porovnané s jednoduchými prediktívnymi regulátormi. Algoritmus prediktívnych regulátorov je následne upravený na formu rešpektujúcu obmedzenia a vplyv merateľnej poruchy. Práca pojednáva o vhodnosti využitia MPC regulátorov pri implementácii profilu obsadenosti priestorov, presnosti dosiahnutia žiadanej hodnoty a vplyve centrálného vykurovacieho systému. Záver hodnotí možnosti a podmienky využiteľnosti prediktívneho riadenia vzájomne sa rešpektujúcich zónových regulátorov.

Kľúčové slová: Zónová regulácia, genetické algoritmy, decoupling, prediktívne riadenie

Abstract

The proposal of the thesis is to design a feasible form of zone control of the interior of the administrative building with respect to technological and hygienic constraints respecting the thermal comfort of the users. The introduction of this paper deals with the current state of ventilation and air conditioning management and associated constraints. The use of genetic algorithms to find optimal parameters of zone PI controllers in the following part of the work is preceded by their application to control the fan identified by regression analysis and simulation environment. The thesis uses a model of a multidimensional system - six adjacent offices. The multi-dimensional system is controlled as six independent first-order systems by the removal of interconnections. Zone PI controllers with parameters determined by genetic algorithms are then qualitatively compared with simple predictive regulators. The predictive algorithm is then modified to a form of respecting the limitations and impact of a measurable disorder. The paper discusses the suitability of the use of MPC controllers in the implementation of the space occupancy profile, the accuracy of reaching the setpoint and the influence of the central heating system. Conclusion evaluates the possibilities and conditions of applicability of the predictive control of mutually respectable zone controllers.

Key words: Zone regulation, genetic algorithms, decoupling, predictive control

Obsah

Obsah	4
Úvod	5
1 Súčasný stav	6
1.1 Technologické obmedzenia	6
1.2 Hygienické obmedzenia.....	6
1.3 Energetické obmedzenia	7
2 Identifikácia a modelovanie	8
2.1 Identifikácia ventilátora výrobcom udaným vzťahom.....	8
2.2 Identifikácia systému meraním, regresná analýza	8
2.3 Identifikácia systému simulačným modelom	12
2.4 Riadenie vent. PI regulátorom optimalizovaným genetic. algortmami	16
3 Vzájomné tepelné interakcie	18
3.1 Šírenie tepla	18
3.2 Opis tepelnej sústavy časti administratívnej budovy	19
3.3 Riadenie tepelnej sústavy	20
4 Prediktívne riadenie	24
4.1 Zovšeobecnené prediktívne riadenie	24
4.2 Riadiaci algoritmus	25
4.3 Merateľná porucha v GPC	26
4.4 Profil obsadenosti	29
4.5 MPC regulátor s obmedzeniami	32
5 Vplyv centrálného vykurovacieho systému a ekvitermickej regulácia	36
5.1 MPC regulátor pod vplyvom ekvitermickej regulácie.....	36
6 Možnosti využitia nezávislého MPC regulátora	40
Záver	41
Prínosy dizertačnej práce	42
Publikácie autora	42
Použitá literatúra	42

Úvod

Riadenie vnútorného prostredia je neodmysliteľnou súčasťou človekom využívaných objektov, nech už slúžia ako priemyselné, administratívne alebo bytové budovy. Snaha efektívneho využitia energie v súčasnosti podnecuje výrobcov optimalizovať vlastnosti stavebných materiálov, použitej technológie, spôsob získavania energie, pričom je však veľmi dôležité nezabúdať na fakt, že aj najlepšiu technológiu v objekte s pozoruhodnými tepelnoizolačnými vlastnosťami je nutné efektívne riadiť. V praxi sa však často nasadzujú regulátory s továrensky nastavenými parametrami, ktoré nedokážu efektívne reagovať na špecifické podmienky a navzájom spolupracovať. Táto dizertačná práca je venovaná problematike kooperácie viacerých regulátorov a nastaveniu ich parametrov s ohľadom na vzájomné ovplyvňovanie susediacich priestorov budovy. Cieľom je návrh zónového riadenia vnútorného prostredia, ktorý by bol schopný reagovať na zmeny susedných miestností, zabezpečiť žiadaný tepelný komfort v presnom čase, rešpektovať obmedzenia vyplývajúce z reálnej prevádzky a eliminovať vplyv poruchovej veličiny.

Prvá kapitola sa venuje opisu súčasného stavu v riadení tepelnej pohody v budovách, bežne používanej technológii vo vzduchotechnike, praktickým skúsenostiam pri riadení a hygienickým požiadavkám kladených na reguláciu.

Druhá kapitola sa venuje opisu, identifikácii a riadeniu ventilátora v potrubnej sieti. Kapitola porovnáva výsledky identifikácie získané z nameraných dát, vzťahom udaným výrobcom a zo simulačného modelu. Identifikovaný systém je následne riadený pomocou genetických algoritmov, ktoré sú neskôr využité pri regulovaní vzájomne sa ovplyvňujúcich tepelných systémov.

Tretia kapitola je venovaná opisu mnohorozmerného systému tvoreného šiestimi susediacimi kancelármi a ich vzájomným interakciám. Kapitola opisuje riadenie mnohorozmerného systému využívajúce decoupling a využitie genetických algoritmov pri hľadaní optimálnych parametrov regulátorov riadiacich vnútorné navzájom sa ovplyvňujúce priestory.

Štvrtá kapitola opisuje základný princíp prediktívneho riadenia a jeho rozšírenie využiteľné pre špecifiká zónovej regulácie. Algoritmus je rozšírený o profil obsadenosti a vzájomne sa ovplyvňujúce obmedzenia riadiacich veličín susedných miestností.

Piata kapitola pojednáva o vplyve centrálného vykurovacieho systému na riadiaci algoritmus a možnostiach eliminácie poruchovej veličiny reprezentovanú zmenou vonkajšej teploty. Záver hodnotí možnosti a predpoklady použitia prezentovaného riešenia.

1 Súčasný stav

Miera vplyvu obmedzení v riadiacom procese sa vývojom technológií, zdokonalení algoritmov riadenia a kvalitou použitých snímačov a akčných prvkov výrazne znížila, avšak úplne neodstránila. Zabezpečiť pocit tepelnej pohody ľudí alebo optimálne podmienky prostredia rozmanitých technologických procesov sa na prvý pohľad môže zdať jednoduchou úlohou, keďže riadený systém nie je nestabilným, resp. dynamicky zložitým systémom. Výzvou optimalizácie riadenia týchto systémov však netkvie v prekonaní zložitostí, nelinearít alebo nestálosti systému, ale jeho vplyvu na celkovú energetickú spotrebu a možnosti šetrenia energie. Energeticky úsporné riadenie vnútorného prostredia budovy (VPB) má významný vplyv na environmentálne a nepochybne na ekonomické ukazovatele. Nesprávne riadenie technologických procesov má zásadný dopad na kvalitu finálneho produktu, opotrebovanie technológie, bezpečnosť výroby a stratu finančných prostriedkov. Podobne pri riadení mikroklimy budov je nespokojný užívateľ kancelárskych priestorov často rýchlejšou spätnou väzbou ako oddelenie kvality výroby. Obmedzenia pri riadení VPB je možné rozdeliť na obmedzenia technologického charakteru, hygienické obmedzenia, energetické obmedzenia.

1.1 Technologické obmedzenia

Technologické obmedzenia spočívajú hlavne, ako to už z názvu vyplýva, v obmedzeniach použitej technológie, meracích, riadiacich a výkonných prvkoch. Limitom a obmedzeniam snímačov a akčných prvkov sa práca nebude zaoberať. Pri riadení teploty a vlhkosti konkrétneho objektu, alebo priestoru je podstatný výber technológie, ktorá bude želaný stav prostredia efektívne vytvárať. Výber je nepochybne často ovplyvňovaný finančnými možnosťami investora. Stále však platí, že najdrahšie riešenie nemusí byť zároveň tým najvhodnejším. Za výber použitej technológie nesú zodpovednosť projektanti jednotlivých profesií, pri riadení VPB, sú to hlavne profesie vzduchotechnika, chladenie a vykurovanie. Vplyv architektonického riešenia a samotnej koncepcie budovy a použitých materiálov má samozrejme zásadný vplyv na kvalitu prostredia, ak sa však máme orientovať na použitú technológiu, projektanti vyššie uvedených profesií majú rozhodujúcu úlohu. V praxi nastupuje profesia merania a regulácie MaR ako posledná. Na výber technológie často bohužiaľ nemá vplyv. Na riadenie navrhnutého systému je v rámci technologických možností nutné použiť optimálny algoritmus riadenia, ktorý umožní efektívne využitie energie potrebnej na dosiahnutie tepelnej pohody prostredia. Trh ponúka široké spektrum technologických riešení pre rôznorodé typy budov a priestorov, ktoré sa pri úprave teploty a vlhkosti vzduchu musia vyrovnávať hlavne s obmedzeniami spojenými hlavne s limitáciou riadiacich veličín (teplotou prírodného vzduchu), obmedzeniami spojenými s ochranou samotnej technológie (teplota nasávaného vzduchu, protimrazová ochrana, teplota rosného bodu, ...) ako aj s konštrukčnými obmedzeniami (maximálny dopravný tlak potrubnej siete, maximálne otáčky ventilátorov, ...). Tieto obmedzenia majú zásadný vplyv na akčný zásah regulátora a v praxi je nutné tieto obmedzenia pri regulácii brať do úvahy. Neodmysliteľnou súčasťou návrhu algoritmov riadenia vnútorného prostredia budovy je zahrnutie podmienok zabezpečujúcich komfort užívateľa a s tým spojené limity, ktoré je človek ochotný akceptovať.

1.2 Hygienické obmedzenia

Keďže riadenie vnútorného prostredia budov priamo ovplyvňuje človeka, je nutné dbať na toho, aby akčný zásah negatívne neovplyvňoval pocit tepelnej pohody, alebo dokonca nespôsobil človeku zdravotné problémy. Preto musí každý projektant vykurovacieho, chladiaceho, vzduchotechnického a riadiaceho systému myslieť na to, aby jeho návrh rešpektoval normované s odporúčané hodnoty teploty, vlhkosti, rýchlosti prúdenia a pod.

Tepelná pohoda je stav prostredia, v ktorom človek nepociťuje nadmerné teplo ani chlad a ktorý vytvára človeku optimálne podmienky podávať pracovný výkon. Cieľom riadenia vnútorného prostredia je vytváranie priaznivých tepelných pomerov, ktoré sú dôležité z hľadiska fyziologickej termoregulácie človeka a zabezpečenie čistého ovzdušia dôležitého z hygienického hľadiska a zdravia človeka. Na vnútorné prostredie pôsobí veľký počet vzájomne sa ovplyvňujúcich faktorov. Medzi základné patria: zloženie vzduchu, teplota vzduchu, rýchlosť prúdenia vzduchu, vlhkosť, svetlo, hluk, elektromagnetické vplyvy. Tepelný stav vnútorného prostredia ovplyvňujú tieto štyri faktory [1]:

- a.) teplota okolitého vzduchu
- b.) stredná radiačná teplota okolitých plôch
- c.) relatívna vlhkosť vzduchu
- d.) rýchlosť prúdenia vzduchu

Tepelná pohoda okrem vymenovaných faktorov súvisí s aktivitou osoby a tepelným odporom oblečenia. Človek sa cíti pohodlne keď nastáva tepelná rovnováha medzi teplom vyprodukovaným ľudským telom a jeho tepelnými stratami. Čiže produkcia tepla v tele je úmerná rozptylu tepla do prostredia (straty vedením, prúdením, sálaním, vyparovaním potu, dýchaním,...). Pre administratívne budovy v stredoeurópskych krajinách sa považuje za ideálnu teplota pre sediaceho človeka pracujúceho duševne, resp. odpočívajúceho človeka v zime 19°C – 23°C a v lete 24°C – 26°C pričom relatívna vlhkosť vzduchu by sa mala pohybovať v intervale 35 až 70 %. Dôraz je tiež kladený na minimálnu a maximálnu teplotu prírodného vzduchu, ktorá by sa mala pohybovať v intervale 15°C – 35°C Pri teplotách 19°C až 23°C by sa mala rýchlosť prúdenia vzduchu pohybovať v intervale 0,1 až 0,15 m/s a podľa hygienických smerníc koncentrácia oxidu uhličitého pri trvalom pobyte človeka v uzavretej miestnosti nemá prekročiť hodnotu 0,15 obj. % (1500 ppm) - Pettenkoferove hygienické pravidlo. Z uvedeného vyplývajú obmedzenia pre žiadané hodnoty priestorových teplôt, pre ohraničenie teploty prírodného vzduchu, pre rýchlosť vzduchových prúdov ako aj pre minimálne objemy čerstvého vzduchu. Všetky tieto podmienky je pri riadení vnútorného prostredia budovy, špeciálne pri riadení administratívnych budov, kde pri sedavom spôsobe práce človek pociťuje zmeny teploty rýchlejšie, nutné striktne dodržať. Okrem týchto podmienok by mal riadiaci algoritmus v rámci technologických limitov zabezpečiť energeticky priateľnú prevádzku.

1.3 Energetické obmedzenia

V súlade s prijatými ustanoveniami je nutné na každú novú alebo výrazne rekonštruovanú budovu vydať platný energetický certifikát. Certifikát určuje, do akej miery je budova energeticky hospodárna a aké množstvo energie je potrebné na zabezpečenie všetkých energetických potrieb spojených s vykurovaním, chladením, vetraním, prípravu teplej vody a osvetlením. Posudzuje sa skladba obalových konštrukcií, použité materiály, okná, dvere, strecha, technické a technologické vybavenie stavby, zdroje energie, súčinitele prestupu tepla jednotlivých materiálov, geometrické zameranie stavby a pod. Podľa zistených parametrov sa budova začlení do energetickej triedy A-G a podľa globálneho ukazovateľa (spotreby primárnej energie v kWh/m²) energetickej triedy A0/A1/A-G.

Súčasná snaha budovania vysoko kvalitných, energeticky úsporných a trvalo udržateľných budov sa často prejavuje v získavaní medzinárodne uznávaných certifikátov akým je napríklad BREEAM (z ang. Building Research Establishment's Environmental Assessment Method) Je to hodnotiacia metóda prispôbená pre krajiny Európy a to hlavne používaním národných a európskych predpisov a noriem. Metóda je založená na hodnotení desiatich oblastí s rôznou ekologickou mierou hodnotenia. 1.) manažment, 2.) zdravie, 3.) energie, 4.) transport, 5.) voda,

6.) materiály, 7.) odpady, 8.) využitie pôdy a ekológia, 9.) znečistenie, 10.) inovácie. Príklady ďalších medzinárodných certifikátov: Green Globes (Green Globes Environmental Assessment and Rating System), LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), GBTool (Green Building Tool), SBToolCZ.

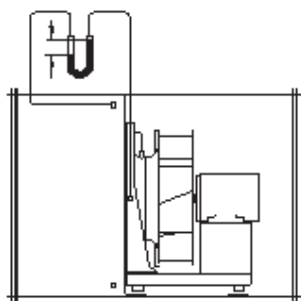
Získanie certifikátu je pre realizátora určitým prestížnym ocenením a vyhliadkou rýchleho získania a zazmluvnenia nájomníkov. Kvôli ochrane životného prostredia a nepochybne aj kvôli prestíži energetických certifikátov je na výber technológie a algoritmu riadenia celej budovy kladený veľký dôraz. Preto energetické hľadisko a úsporné využívanie akčných prvkov v radiacích obvodoch musí mať výrazne zastúpenie pri tvorbe účelovej funkcie.

2 Identifikácia a modelovanie

Kapitola sa venuje identifikácii a riadeniu ventilátora, opisu modelovanej sústavy ventilátora vo vzduchotechnickom zariadení a následnom porovnaní identifikovanej sústavy s vytvoreným modelom. Na základe porovnania je vybratý najlepší model, ktorý je následne použitý pri riadení genetickými algoritmi, ktoré následne tvoria základný nástroj výberu optimálnych parametrov zónových PI regulátorov.

2.1 Identifikácia ventilátora výrobcom udaným vzťahom

Výrobca ventilátora uvádza možnosť merania diferenčného tlaku pomocou rozdielu statického tlaku v pretlakovej komore na strane nasávania a tlaku na strane kužela, ako to je zrejmé na obr. č. 1. Pri takomto zapojení uvádza výrobca vzťah závislosti prietoku od



Obrázok č. 1:
Umiestnenie odberných miest merania

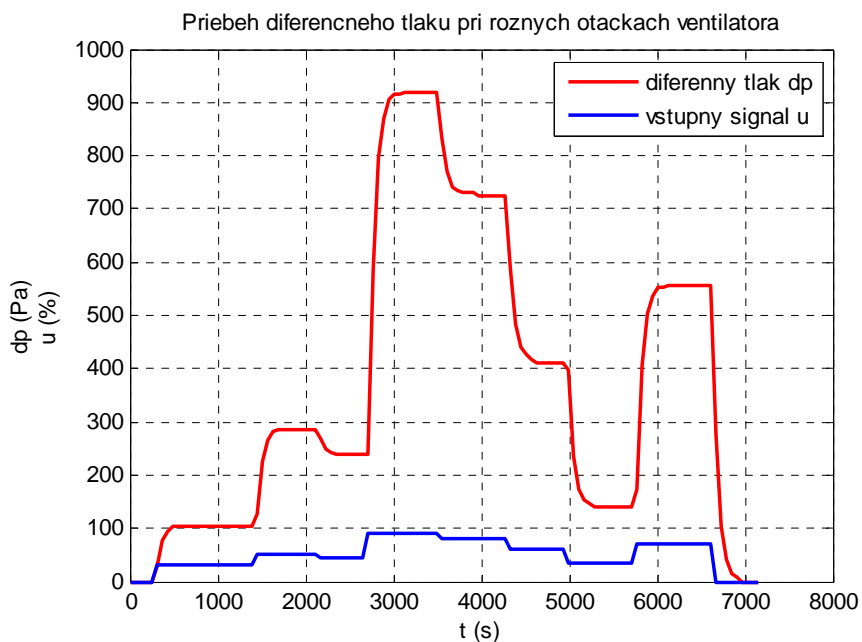
diferenčného tlaku (2.1), pričom K je kalibračný faktor ventilátora, určený porovnávacím meraním k štandardizovanému skúšobnému kuželu a $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ je hustota vzduchu. Po jeho úprave dostávame výraz závislosti diferenčného tlaku na kvadráte prietoku. Kalibračný faktor pre uvedený motor má hodnotu $K = 242 \text{ ms}^2/\text{h}$ a pri nemeniacej sa hustote vzduchu $k = 1,02452e-5 \text{ kg h}^2/\text{m}^7\text{s}^2$. Aby bolo možné jednoducho pracovať s radiacím signálom v intervale 0-100 %, je koeficient k sohľadom na nominálny prietok prepočítaný na koeficient $k_N = 0,11188 \text{ kg/ms}^2$. Závislosť diferenčného tlaku od radiacej veličiny je teda daná vzťahom (2.2).

$$\dot{V} = K \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p_d} \rightarrow \rightarrow \Delta p_d = \frac{\rho}{2K^2} \dot{V}^2 = k \dot{V}^2 = k \left(\frac{u}{100} \dot{V}_N \right)^2 = k_N u^2 \quad (2.1)$$

$$\Delta p_d = k_N u^2 = 0,11188 u^2 \quad (2.2)$$

2.2 Identifikácia systému meraním, regresná analýza

Pri identifikácii bol použitý spojitý snímač tlakovej diferencie s meracím rozsahom 0-2000 Pa a výstupným napäťovým signálom 0-10 V. Odberné miesta boli izolované, aby sa predišlo ovplyvneniu merania atmosférickým tlakom. Odberné miesta so zasunutými gumenými hadičkami boli umiestnené pred a za ventilátor. Na obr. č. 2 je zobrazený časový priebeh tlakovej diferencie pri rôznych otáčkach ventilátora.



Obrázok č.2: Časový priebeh diferenčného tlaku pri rôznych otáčkach ventilátora

Pre správy výber štruktúry identifikovaného systému je dôležitý vzťah, ktorý uvádza výrobca, teda kvadratická závislosť tlaku od vstupného signálu. Keďže výstup systému, takmer okamžite reaguje na vstupný signál a nelineárne ho zosilňuje, systém bude opísaný statickým modelom v tvare mocninového radu pomocou regresnej analýzy. Môžeme teda systém opísať v tvare (2.3), kde $y \in R^1$ je výstupom systému, ktorý je funkčne závislý na n nezávislých veličinách $u \in R^n$ (n -faktorový problém) a od náhodne pôsobiacich faktorov $v \in R^1$. θ je vektor neznámych parametrov a F funkcia štruktúry.[5] Predpokladá, že štruktúra systému nie je známa a tak sa vyjadruje takzvanou teoretickou regresnou rovnicou, ktorá je vyjadrená

$$y = F(u, \theta) + v \quad (2.3)$$

v tvare mocninového radu. (2.4).

$$y = \theta_0 + \sum_{i=1}^n \theta_i u_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i \theta_{ij} u_i u_j + \dots + v \quad (2.4)$$

Táto funkcia je nelineárna voči nezávislým premenným vektora $u = (u_1, u_2, \dots, u_n)^T$, ale lineárna voči regresným koeficientom $\theta_0, \theta_i, \theta_{ij}$. Popri definovanej štruktúre systému je potrebné definovať model. Ten je tiež opísaný v tvare mocninového radu (2.5) stupňa s bez náhodnej zložky v , pričom $\hat{\theta}$ je odhad vektora parametrov.

$$\hat{y} = \varphi(u, \hat{\theta}) \quad (2.5)$$

Ak je počet nezávislých premenných n , potom n – faktorový model stupňa s bude mať spolu s absolútnym členom $1 + k = \binom{n+s}{s}$ neznámych parametrov. Stupeň polynómu by nemal presiahnuť hodnotu $s = 3$. Ak $s=1$, hovoríme o lineárnej regresii (2.6).

$$\hat{y} = \hat{\theta}_0 + \hat{\theta}_1 u_1 + \dots + \hat{\theta}_n u_n \quad (2.6)$$

Ak $s=2$ potom ide o kvadratickú regresiu (2.7).

$$\hat{y} = \hat{\theta}_0 + \hat{\theta}_1 u_1 + \dots + \hat{\theta}_n u_n + \hat{\theta}_{n+1} u_1^2 + \dots + \hat{\theta}_{2n+1} u_n^2 + \hat{\theta}_{2n+1} u_1 u_2 + \dots + \hat{\theta}_k u_{n-1} u_n \quad (2.7)$$

Ak je pri identifikácii ventilátora za model zvolený kvadratický polynóm $s=2$, výraz (2.6) sa zjednoduší na tvar (2.8), keďže nezávislá premenná je iba jedna $n=1$, pričom počet hľadaných parametrov bude $1 + k = 3$.

$$\hat{y} = \hat{\theta}_0 + \hat{\theta}_1 u + \hat{\theta}_2 u^2 \quad (2.8)$$

Zovšeobecnene možno modely vyjadriť v tvare lineárnej regresie (2.9).

$$\begin{aligned} \hat{y} &= \hat{\theta}^T f(u) \\ \hat{\theta} &= (\hat{\theta}_0, \hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_k)^T \\ f(u) &= (f_0(u), f_1(u), \dots, f_k(u))^T \end{aligned} \quad (2.9)$$

Pri predpoklade, že bude uskutočnených N meraní, pri každom z nich sa bude určovať hodnota výstupu y_i a hodnoty zložiek vektora $f(u_i) = (1, h_{1i}, h_{2i}, \dots, h_{ki})^T = h_i$, pre $i=1, \dots, N$. Potom pri i -tom meraní bude hodnota odchýlky $e_i = y_i - \hat{y}_i = y_i - \hat{\theta}^T h_i$.

$$\begin{aligned} e_1 &= y_1 - \hat{\theta}_0 - \hat{\theta}_1 h_{11} - \hat{\theta}_2 h_{21} - \dots - \hat{\theta}_k h_{k1} \\ e_2 &= y_2 - \hat{\theta}_0 - \hat{\theta}_1 h_{12} - \hat{\theta}_2 h_{22} - \dots - \hat{\theta}_k h_{k2} \\ &\vdots \\ e_N &= y_N - \hat{\theta}_0 - \hat{\theta}_1 h_{1N} - \hat{\theta}_2 h_{2N} - \dots - \hat{\theta}_k h_{kN} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Tým sa vytvorí preurčený systém rovníc (2.10) zapísaný vo vektorovom tvare $e = y - H\hat{\theta} = e(\hat{\theta})$,

$$\text{kde } e = y - \hat{y} = (e_1, e_2, e_N)^T; \quad y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{pmatrix}; \quad H = \begin{pmatrix} 1 & h_{11} & h_{21} & \dots & h_{k1} \\ 1 & h_{12} & h_{22} & \dots & h_{k2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & h_{1N} & h_{2N} & \dots & h_{kN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_1^T \\ h_2^T \\ \vdots \\ h_N^T \end{pmatrix}$$

Vektor neznámych parametrov $\hat{\theta}$ preurčeného systému rovníc sa určí minimalizáciou súčtu štvorcov odchýlok – metóda najmenších štvorcov. Optimálnu hodnotu odhadu parametrov je možné určiť z nulovej hodnoty gradientu účelovej funkcie (2.11). Riešením rovnice je Gaussov vzorec (2.12).

$$Q(\hat{\theta}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N e_i^2 = \frac{1}{2} e(\hat{\theta})^T e(\hat{\theta}) = \frac{1}{2} (y - H\hat{\theta})^T (y - H\hat{\theta}) \quad (2.11)$$

$$\hat{\theta}^* = (H^T H)^{-1} H^T y \quad (2.12)$$

Aby bolo možné určiť hodnoty odhadov parametrov podľa Gaussovho vzorca, je nutné, aby matica $R = H^T H$ (Hessova matica) bola pozitívne definitná (má všetky vlastné čísla kladné). To je splnené, keďže súčin nenulovej matice a jej transpozície je vždy symetrická a pozitívne definitná matica. Táto podmienka je kladená kvôli tomu, aby bolo možné vytvoriť takzvanú disperznú maticu $P = R^{-1} = (H^T H)^{-1}$.

Ako si je ale možné všimnúť po naplnení matice H príslušnými hodnotami, matica H sa stáva plnou maticou a matica R a ani P nie sú diagonálne, čo môže značne sťažiť výpočet. V takomto prípade sa matica R môže javiť ako singulárna a tým aj neinvertovateľná. Pri veľkom počte meraní zohráva vplyv aj presnosť výpočtového prvku. Aby sa zabránilo zlyhaniu výpočtu v dôsledku problémov pri invertovaní matice R , efektívne je možné namiesto hľadania matice P , riešiť preurčený systém rovníc s upravenou účelovou funkciou (2.13).

$$Q(\hat{\theta}) = \frac{1}{2} \left((H \quad y) \begin{pmatrix} \hat{\theta} \\ -1 \end{pmatrix} \right)^T \left((H \quad y) \begin{pmatrix} \hat{\theta} \\ -1 \end{pmatrix} \right) = \frac{1}{2} c^T A^T A c = Q(c) \quad (2.13)$$

$$A = (H \quad y); \quad c = \begin{pmatrix} \hat{\theta} \\ -1 \end{pmatrix}$$

Pričom matica A má rozmer $N \times (k+2)$ a obsahuje namerané dáta a vektor c má rozmer $(k+2) \times 1$ a obsahuje hľadané parametre. RQ rozkladom obdĺžnikovej matice A na ortogonálnu maticu D s rozmermi $N \times N$ a hornú trojuholníkovú maticu Z s rozmermi $N \times (k+2)$, $z_{ij}=0$ pre $i>j$ sa docieli úprava účelovej funkcie do formy (2.14) a zároveň vyplývajúca rovnosť $e=Zc$, pričom z maticového zápisu sa použije iba $k+2$ riadkov.

$$Q(c) = \frac{1}{2} c^T A^T A c = \frac{1}{2} c^T A^T D^T D A c = \frac{1}{2} c^T Z^T Z c = \frac{1}{2} e^T e \quad (2.14)$$

$$\begin{pmatrix} \bar{Z} & \bar{z} \\ 0^T & z_{(k+2)(k+2)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\theta} \\ -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_{k+1} \\ e_{k+2} \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

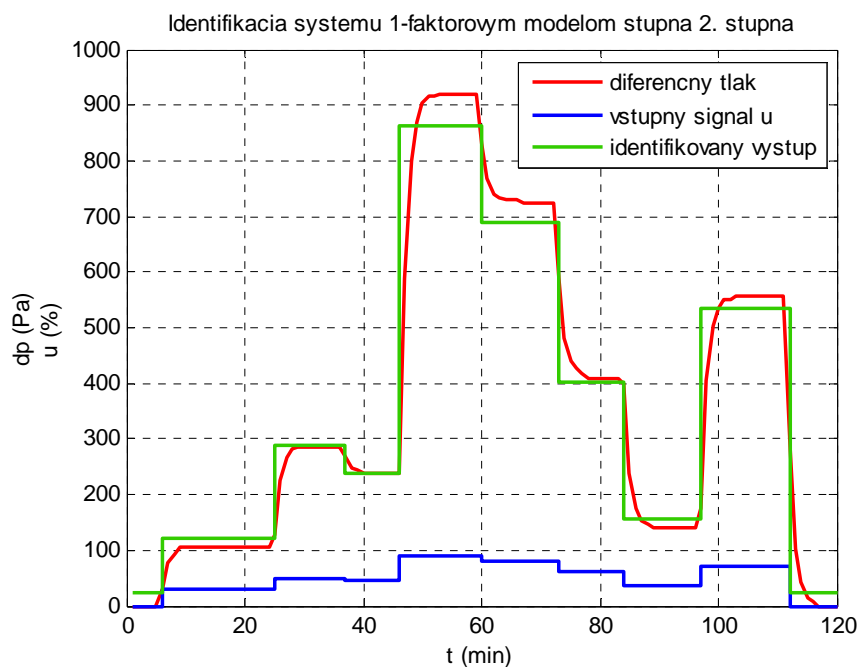
Z prvého riadku maticového zápisu (2.15) je možné určiť vektor hľadaných parametrov a z druhého riadku hodnotu účelovej funkcie.

$$\begin{aligned} \bar{Z} \hat{\theta} - \bar{z} &= e_{k+1} \rightarrow \rightarrow e_{k+1} = 0 \rightarrow \rightarrow \hat{\theta}^* = \bar{Z}^{-1} \bar{z} \\ -z_{(k+2)(k+2)} &= e_{k+2} \rightarrow \rightarrow Q(\hat{\theta}^*) = \frac{1}{2} (e_{k+1}^T e_{k+1} + e_{k+2}^2) = \frac{1}{2} z_{(k+2)(k+2)}^2 \end{aligned} \quad (2.16)$$

Vzťahy (2.16) sú finálnym bodom postupu, ako sa vyhnúť invertovaniu matice R . Otázkou zostáva ako upraviť maticu A na hornú trojuholníkovú maticu Z . Existuje veľa metód ako to urobiť, uvedieme metódu, ktorá bola použitá pri identifikácii ventilátora, tzv. Givensova metóda.

Na identifikáciu boli použité skokové zmeny od 30 do 100 % nominálnych otáčok ventilátora, pričom merané hodnoty tlakovej diferencie boli merané každú minútu. Ako výstupné dáta boli v prvom prípade použité všetky namerané údaje, v druhom prípade len hodnoty, na ktorých sa výstup ustálil a to z dôvodu zbytočného preurčenia matice A . Treba si uvedomiť, že na identifikáciu bol zvolený statický model, ktorý opisuje väzbu medzi ustálenými vstupno-výstupnými veličinami algebraickými rovnicami a čas nevystupuje ako nezávislá premenná. V oboch prípadoch bola na výpočet odhadov koeficientov použitá lineárna a kvadratická regresia, pričom inverzii matice R sa vyhol výpočet určením hornej trojuholníkovvej

matice pomocou Givensovej metódy. Obr. č. 3 a č. 4 porovnávajú identifikovaný výstup s meraným diferenčným tlakom.



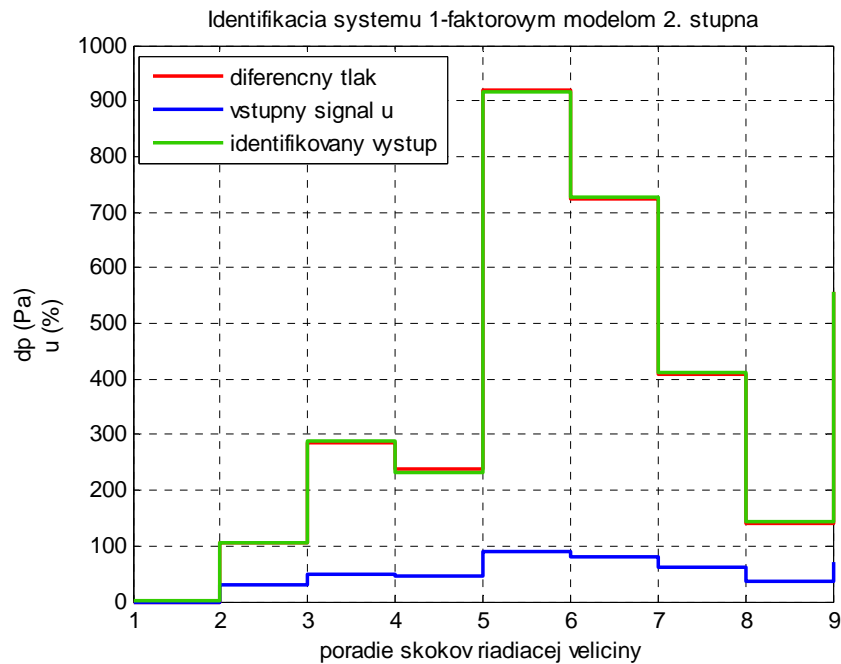
Obrázok č. 3: Identifikácia systému 1-faktorovým modelom 2. stupňa (použité všetky namerané údaje).
Odhadnuté koeficienty: $\hat{\theta}_0^* = 23,587$; $\hat{\theta}_1^* = 0,242$; $\hat{\theta}_2^* = 0,101$

Riadenie systému s okamžitou odozvou a obmedzenou možnosťou výraznejšie zasahovať do dynamiky rýchlych systémov (napr. integračnú konštantu regulátora nie je možné nastaviť pod hodnotu jednej minúty) statický model s kvadratickým polynómom bude vyhovovať, keďže takmer kopíruje ustálené hodnoty tlakovej diferencie. Pod jednotlivými grafmi sú uvedené hodnoty hľadaných odhadov regresných koeficientov. Funkčnú závislosť výstupu pre polynóm 2. stupňa udáva výraz:

$$\Delta p_d = \hat{\theta}_2^* u^2 + \hat{\theta}_1^* u + \hat{\theta}_0^* = 0,112u^2 + 0,162u + 0,360 \quad (2.17)$$

2.3 Identifikácia systému simulačným modelom

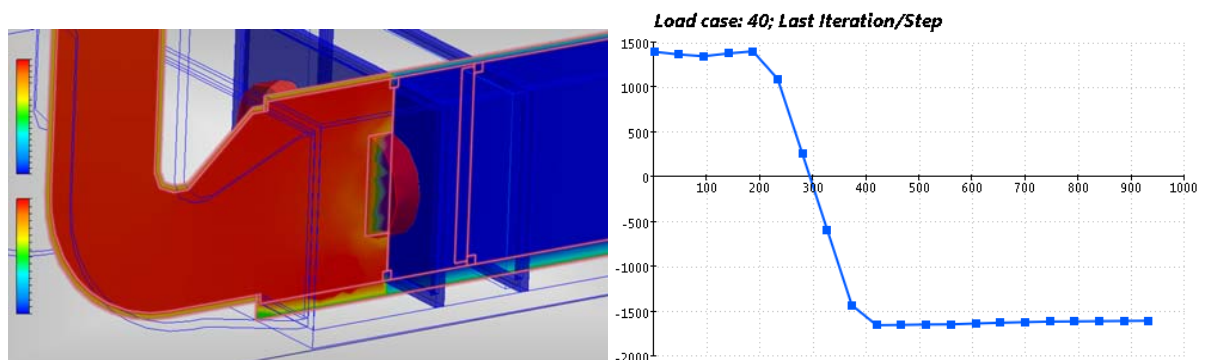
Snaha vytvoriť simulačný model vzduchotechnického zariadenia súvisí s pochopením a vizuálnym prezentovaním fyzikálnych dejov prebiehajúcich pri presune vzduchových hmôt a šírení tepla. Simulačné modely vzduchotechník slúžia projektantom ako základ analýzy vytvoreného systému, na kontrolu tlakových strát, identifikovaní oblastí s najvyššou rýchlosťou prúdenia, na určenie častí s najpravdepodobnejším výskytom defektu, častí ktoré sa najviac prehrievajú a na konečné zhodnotenie efektivity systému. Analýza modelu predchádza možným skrytým problémom, ktoré na ktoré pri projektovaní mohlo opomenúť a v konečnom dôsledku šetrí finančné prostriedky vynaložené na opravu existujúceho systému, spôsobenú napr. výkonovým poddimenzovaním niektorých súčastí. Ako predloha k modelu slúžilo vzduchotechnické zariadenie určené na tepelnú úpravu vzduchu distribuovaného do aktívnych chladiacich trémov osemposchodovej administratívnej budove. Vzduchotechnické zariadenie má dva hlavné prírodné kanály, distribuujúce vzduch do kancelárskych priestorov na šiestich



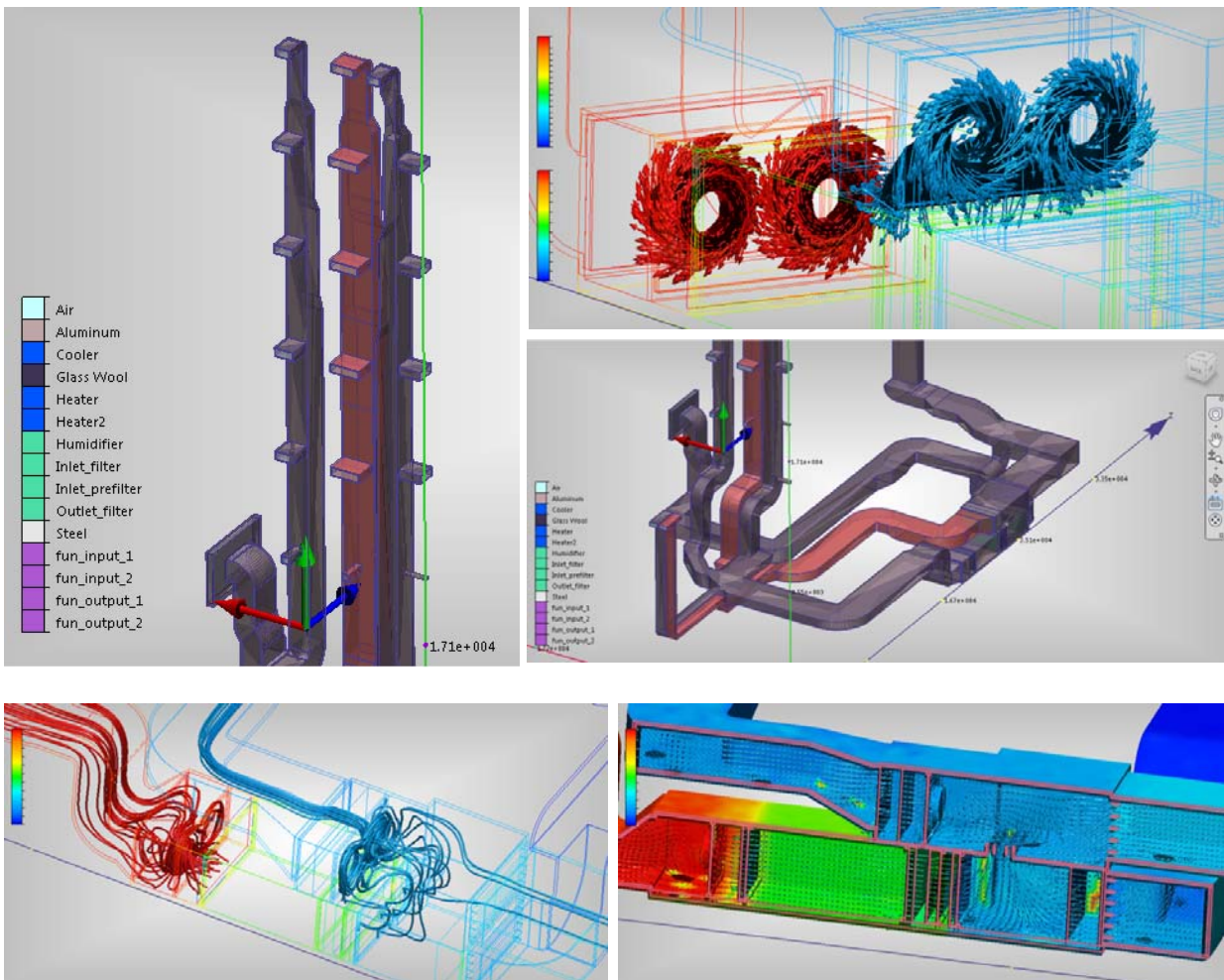
Obrázok č. 4: Identifikácia systému 1-faktorovým modelom 2. stupňa (použité iba ustálené hodnoty).
 Odhadnuté koeficienty: $\hat{\theta}_0^* = 0,360$; $\hat{\theta}_1^* = 0,162$; $\hat{\theta}_2^* = 0,112$

poschodiach s prietok vzduchu cca. $\dot{V} = 1750 \text{ m}^3/\text{h}$ a jeden vedľajší kanál a jeden samostatný kanál na prepravu vzduchu do podzemných garáží. Ako prívod vzduchu slúži jednotke samostatný kanál čerstvého vzduchu s prietokom spomenutých $\dot{V} = 20900 \text{ m}^3/\text{h}$. Odvod znečisteného vzduchu z kancelárií zabezpečuje jeden hlavný odvodný kanál s prietokom $\dot{V} = 2855 \text{ m}^3/\text{h}$ na každom podlaží a jeden menší vedľajší kanál. Znečistený vzduch je následne odvádzaný odvodným potrubím na strechu objektu s prietokom $\dot{V} = 16720 \text{ m}^3/\text{h}$ pričom prekonáva výšku približne 30 m. Na obr. č. 6 sú zobrazené detaily modelu vzduchotechnického zariadenia, komory ventilátorov, vektory rýchlostí prúdenia vzduchu sfarbené podľa intenzity a prúdnic vzduchu prechádzajúceho cez ventilátory.

Pri simulácii bolo uskutočnených 6 rôznych nastavení otáčok ventilátora, z pôvodných 9 skokových zmien, a to kvôli neuskutočniteľnosti simulácii pri nízkych tlakoch. Zber údajov pozostával z výberu bodov na pomyselnjej platni prechádzajúcej ventilátorom, ako to vidieť na obr. č. 5.



Obrázok č. 5: Zobrazenie tlakovej diferencie a odpočet údajov zo simulácie



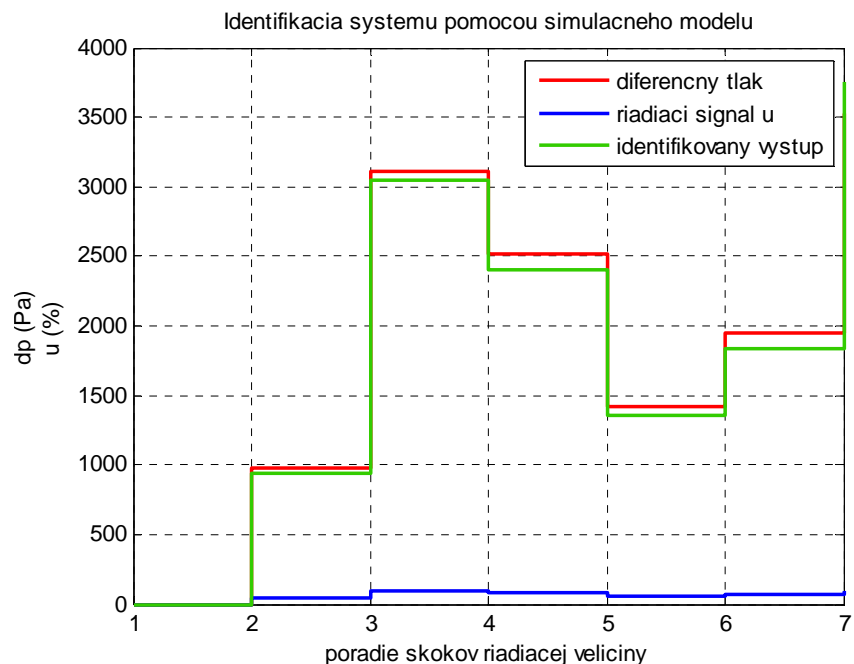
Obrázok č. 6: Details modelu vzduchotechnickej jednotky a potrubnej sústavy

Z nameraných údajov bol zostavený vektor b rozmeru 6×1 a zo znalosti štruktúry danej výrobcom (kvadratická závislosť) bol vektor A rozmeru 6×6 zvolený ako kvadrát vstupného signálu. Z rovnice $Ax=b$ sa pomocou funkcie *mldivide* (funkcia v Matlabe realizujúca delenie matice A zľava) je možné získať neznámu x . Zápis vektorov so zaokrúlenými nameranými údajmi je uvedený v rovnici (2.18).

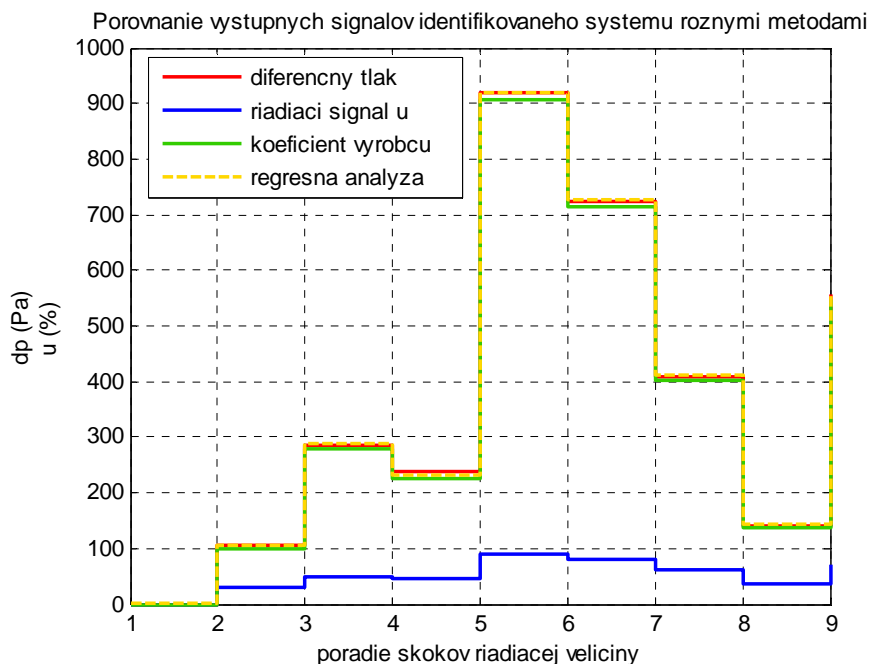
$$Ax = b \quad \rightarrow \quad x = A \setminus b = u.^2 \setminus y = \begin{pmatrix} 2500 \\ 8100 \\ 6400 \\ 3600 \\ 4900 \\ 10000 \end{pmatrix} \setminus \begin{pmatrix} 980 \\ 3115 \\ 2519 \\ 1420 \\ 1950 \\ 3531 \end{pmatrix} = 0,3754 \quad (2.18)$$

Z porovnania koeficientov určených pomocou teoretického vzťahu výrobcom ventilátora a zo simulácie je zrejmé, že líšia viac ako trojnásobne. Tento výsledok však nie je prekvapivý, v simulačnom modeli bol ventilátor modelovaný zjednodušene a nedá sa kvantitatívne porovnať s koeficientom určeným výrobcom (myslí sa tým kalibračný faktor ventilátora K). Pri určenom koeficiente $k_N = 0,3754 \text{ kg/ms}^2$ by museli mať ventilátory kalibračný faktor $132 \text{ ms}^2/\text{h}$. Dôležité je však to, že oba spôsoby indentifikácie dokázali, že diferenčný tlak je kvadraticky závislou premennou riadiaceho signálu. Obr. č. 7 porovnáva údaje namerané v simulačnom prostredí a ich kvadratickú závislosť na vstupnom signále. Porovnanie nameranej

diferencie tlaku (v ustálenom stave), výstupu získaného továrenským vzťahom a výstupu identifikovaného pomocou regresnej analýzy rozbrazuje obr. č. 8. S ohľadom na výsledky zobrazené na obr. č. 8 bude za opis systému pokladaný kvadratický polynóm $\Delta p_d = 0,112u^2 + 0,162u + 0,360$. Tento model bude následne použitý pri hľadaní optimálnych parametrov PI regulátora pomocou genetických algoritmov.



Obrázok č. 7: Identifikácia systému simulačným modelom (vynechané niektoré skokové zmeny)



Obrázok č. 8: Porovnanie výstupných signálov identifikovaného systému (ustálené hodnoty)

2.4 Riadenie ventilátora PI regulátorom optimalizovaným genetickými algoritmi

Dimenzovanie výkonu ventilátora je neoddeliteľnou súčasťou projektovania vzduchotechnickej jednotky. Pri návrhu a dodatočnej analýze simulačných modelov však nie je možné predvídať všetky zmeny v potrubnej sieti. Vplyvom, často, nepretržitého chodu jednotky sa zanášajú filtre a výmenníky, čo má za následok zmenu tlakových strát. Preto je nutné vybrať ventilátor s dostatočnou rezervou objemu dopravovaného vzduchu a dopravného tlaku. Regulovať ventilátory je možné v zásade tromi spôsobmi [1]:

a.) škrtením, b.) zmenou otáčok, c.) natáčaním obežných lopatiek
Regulácia plynulou zmenou otáčok je z energetického a hygienického (akustického) hľadiska najlepšou voľbou. Nasledujúce riadky sa venujú hľadaniu optimálnych parametrov PI regulátora frekvenčného meniča ventilátora pomocou genetických algoritmov, ktoré budú v ďalších kapitolách použité na vytvorenie optimálnej skladby regulátorov susediacich miestností v administratívnej budove

Vzorom genetických algoritmov je prirodzená selekcia a vývoj v prírode. Ako fungujúci a stabilný systém zabezpečuje priestor na prežitie a možnosť reprodukcie iba tým jedincom, ktorí sú spomedzi ostatných najsilnejší a majú najvyššiu pravdepodobnosť reprodukcie zdravých jedincov. Navyše je systémom, ktorý sa na základe zmeny podmienok dokáže prispôbiť a adaptovať. Tieto vlastnosti boli vzorom aj pri hľadaní optimálnych riešení širokého spektra problémov, ktoré svojou náročnosťou vylučovali analytické riešenia. Základnými stavebnými kameňmi týchto algoritmov sú [7] : reťazec (chromozóm), gén, populácia a kríženie, mutácia, selektívny výber. Cieľom nie je podrobne vysvetliť princíp a detaily výpočtového algoritmu, tak sa obmedzme na základné informácie.

Pred realizáciou samotného algoritmu je nutné uskutočniť niekoľko krokov.

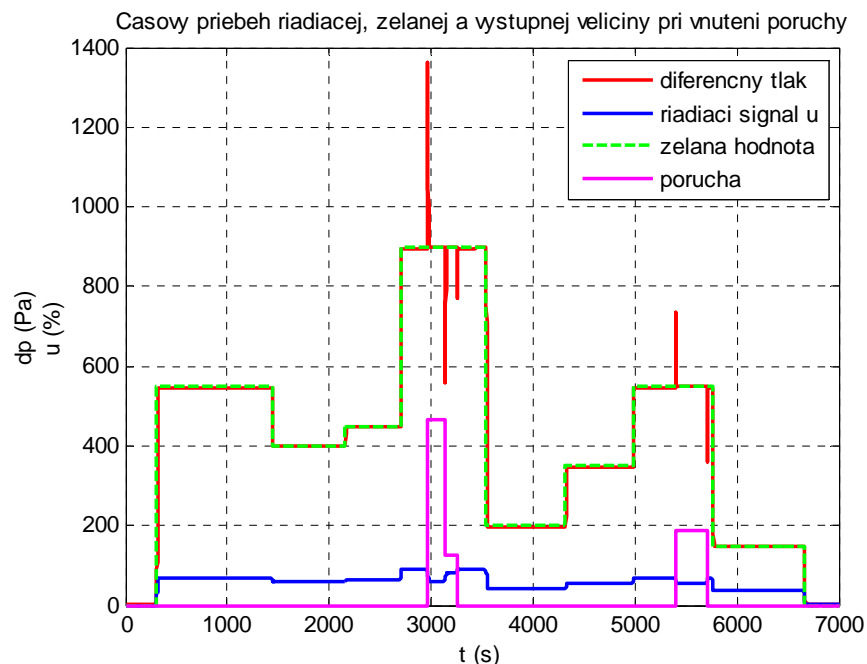
- a.) Zakódovať parametre optimalizovaných parametrov do reťazca v určitom poradí. Pri optimalizácii regulátora ventilátora sú to parametre PI regulátora: [P I].
- b.) Ohraničiť priestor riešení, teda zvoliť dolný a horný limit daných parametrov. Vhodné ohraničenie parametrov pomáha k urýchleniu konvergencie a šetrí výpočtový čas zbytočného prehľadávania priestoru s neprijateľnými riešeniami.
- c.) Vytvoriť účelovú funkciu s ohľadom na obmedzenia a vytvorenie pokutovej funkcie.
- d.) Zvoliť primeranú veľkosť populácie. Je potrebné brať do úvahy vlastnosti riešeného problému, veľkosť prehľadávaného priestoru, ohraničenia a dostatočnú diverzitu.

Princíp algoritmu je možné zhrnúť do nasledovných krokov [7].

- a.) Vygenerovanie počiatočnej populácie.
- b.) Vyhodnotenie každého chromozómu v aktuálnej populácii účelovou funkciou.
- c.) Vyhodnotenie ukončovacích podmienok a prípadné vyhodnotenie najlepšieho reťazca pri ukončení.
- d.) V prípade nesplnenia ukončovacích podmienok sa do novej generácie presúva skupina najlepších reťazcov (resp. minimálne jeden), čím je zabezpečená monotónna konvergencia úlohy. Druhú skupinu reťazcov tvorí skupina, nad ktorou sa vykonajú operácie kríženia a na záver operácia mutácie. Tie dve operácie môžu byť vykonávané aj

na rozdelenej skupine, aby sa predišlo strate skrížených jedincov s možnými lepšími vlastnosťami. Nová populácia tak vznikne zjednotením skupín jedincov prenesených bezo zmeny a novovytvorených jedincov, pričom veľkosť populácie ostáva totožná. Algoritmus sa ukončí podľa ukončovacej podmienky buď vopred zadaným kritériom na riešenie, alebo kvôli nemeiacej sa hodnote účelovej funkcie počas n-generácií, alebo na základe rozptylu medzi jednotlivými členmi populácie.

Pri hľadaní optimálnych parametrov PI regulátora ventilátora opísaného rovnicou (2.17) bola použitá desaťčlenná populácia, selektívny výber uprednostňoval najlepšieho, druhého a tretieho najlepšieho člena populácie a do novej generácie boli traja členovia skopírovaný bezo zmeny. Ostatných sedem členov bolo vybratých pomocou turnajového výberu, pričom pole, z ktorého bolo možné vyberať, obsahovalo aj spomenutých troch najlepších členov. Sedem reťazcov bolo následne krížených a potomkovia boli podrobení aditívnej mutácii pri miere početnosti mutácie v generácii 0,1 a pred vstupom do novej generácie bol z potomkov odstránený ich duplicitný výskyt. Duplicitní potomkovia boli nahradení mutáciou ľubovoľného génu. Nová generácia tak vznikla z prvých troch najúspešnejších jedincov predošlej generácie a siedmich nových jedincov. Ukončovacou podmienkou bolo dosiahnutie 30 generácií. Účelová funkcia bola zadaná vo všeobecnom tvare s možnosťou pokutovať regulačnú odchýlku a veľkosť riadiacej veličiny, pričom ju je možné doplniť o obmedzenie typu nerovnosť (napr. maximálna hodnota akčného zásahu). Obmedzenia PI parametrov boli nastavené v intervaloch $P \in \langle 0,10 \rangle$; $I \in \langle 0,001; 5 \rangle$. Po ukončení algoritmu bol za optimálny reťazec vyhodnotený $[P; I] = [19,6736; 0,001]$. Na obr. č. 9 je zobrazené porovnanie priebehu želaného diferenčného tlaku s výstupom. Do systému bola privádzaná porucha, ktorú možno interpretovať ako škrtenie pomocou klapky. Pri zmene potrubnej charakteristiky, konkrétne pri škrtení, sa zvýši tlaková strata a zníži prietok vzduchu kanálom. Tlak za ventilátorom sa v dôsledku väčšieho odporu zvýši a s ním aj meraná tlaková diferencia. Na udržanie konštantnej tlakovej diferencie je potrebné znížiť otáčky ventilátora zmenou frekvencie meniča. Ako z obr. č. 9 vidieť, regulátor so zvolenými parametrami dokáže spoľahlivo reagovať aj na výrazné poruchy potrubnej siete. Poruchy vzniknuté v potrubí je možné modelovať ako skokové zmeny, keďže potrubná charakteristika je tvorená súčtom tlakových strát na vzduchotechnickej trase.



Obrázok č.9: Porovnanie časového priebehu riadiacej, zelanej a výstupnej veličiny

Z uvedených simulácií možno dedukovať, že úspešné zistenie parametrov PI regulátora pomocou genetických algoritmov závisí na zvolení vhodnej veľkosti populácie, definovaní účelovej funkcie s ohľadom na ohraničenia systému, definovaní pokutovej funkcie, výbere stratégie operácií kríženia a mutácie. Nemenej dôležitá je pri algoritme definícia ukončovacej podmienky a vyváženosť výpočtovej a časovej náročnosti. Možnosť jednoducho zakomponovať nelimitované množstvo obmedzení pri hľadaní optima ponúka využiť genetické algoritmy aj pri mnohorozmerných systémoch so vzájomnými väzbami, medzi ktoré patrí aj regulácia vnútorného prostredia budovy.

3 Vzájomné tepelné interakcie

Táto kapitola sa venuje opisu modelu časti administratívnej budovy a vzájomných interakcií medzi jednotlivými miestnosťami. Pomocou simulačného programu je vytvorený model, kde je zobrazená vzájomná interakcia medzi poschodiami. Mnohorozmerný systém šiesteho rádu je pomocou vstupno-výstupnej linearizácie transformovaný na šesť lineárnych vzájomne neovplyvňujúcich sa systémov prvého rádu (decoupling). Týmto systémom sú následne pomocou genetických algoritmov hľadané optimálne parametre PI regulátorov. V závere kapitoly sú porovnané akčné zásahy a vzájomný vplyv na výstupné veličiny pri zmene želanej teploty pri použití decouplingu a pri regulovaní bez rešpektovania vzájomných väzieb.

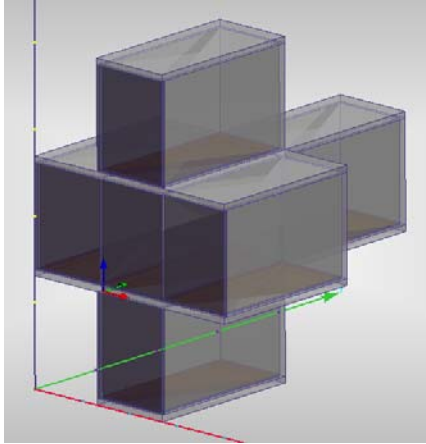
3.1 Šírenie tepla

Teploto je mierou energie, ktorú pri tepelnej výmene odovzdá teplejšie teleso chladnejšiemu. Šíri sa vedením (kondukciou), prúdením (konvekciou), žiarením (radiáciou) a prenosom látok (tok viazaného tepla). Prenos tepla vedením sa uskutočňuje na molekulárnej úrovni, kedy susediace molekuly s rozdielnou teplotou medzi sebou interagujú, kým nedôjde k vyrovnaniu teplôt. K prenosu tepla prúdením dochádza v kvapalinách a plynch, a to vplyvom závislosti hustoty tekutín od ich teploty. Pri rozdielnej teplote majú tekutiny rôznu hustotu a tak dochádza k prirodzenému prúdeniu a k ich vzájomnému premiešavaniu a vyrovnávaniu teplôt [4]. Prenos tepla žiarením (pri teplotách nad 1000 K) je spôsobené šírením elektromagnetických vln infračerveného spektra ($\lambda = 0,8 \cdot 10^{-6}$ až $0,8 \cdot 10^{-3}$ m) v priestore bez potreby makroskopického prostredia. Prenos je podmienený rozdielom teplôt a priepustnosťou prostredia. Prenos tepla medzi tekutinami oddelenými pevnou látkou sa nazýva prechod tepla. Tvoria ho tri procesy: prestup tepla z ochladzovanej tekutiny, vedenie tepla pevnou látkou a prestup tepla z povrchu do ohrievanej tekutiny. Opis celkovej dynamickej charakteristiky tepelnej sústavy vyjadruje rovnica vychádzajúca zo zákona zachovania tepelnej energie a ktorá definuje, že rýchlosť zvyšovania teploty telesa je úmerná množstvu tepla privedeného do telesa vedením, prúdením, sálaním, horením a zmenou skupenstva. Pričom tepelné toky vstupujúce do telesa majú v rovnici znamienko +, tepelné toky vystupujúce z telesa majú znamienko -. Pri opise sústavy je nutné napísať toľko rovníc (3.1), koľko tepelných kapacít sa v sústave nachádza, t.j. pre všetky časti, ktoré sú schopné akumulovať tepelnú energiu. Rovnica (3.1) je základom fyzikálneho opisu zvolenej časti administratívnej budovy.

$$mc_p \frac{dT}{dt} = \sum_{i=1}^N H_i \quad (3.1)$$

3.2 Opis tepelnej sústavy časti administratívnej budovy

Za modelový príklad bola zvolená skupina šiestich kancelárií v troch nadzemných podlažiach, pričom päť kancelárií je v kontakte so sklenenou fasádou, jedna kancelária je obklopená iba vnútorným prostredím ako to vidieť na obr. č. 10. Tepelné toky vstupujúce do každej kancelárie sú spôsobné prechodom tepla so susedných miestností, nútenou konvekciou



Obrázok č. 10: Model kancelárií

prírodnej vzduchotechniky a konštantným tepelným výkonom konvektora. Tepelné toky vystupujúce z každej z kancelárií sú dané prechodom tepla do vonkajšieho prostredia a do susedných chladnejších miestností, ako aj odsávaným vzduchom odvodnej vzduchotechnickej jednotky. Vnútna teplota susediacich kancelárií (neopisovaných v modeli) ako aj vonkajšia teplota vzduchu sú považované za konštanty. Objemový prietok vzduchu vstupujúci a vystupujúci z kancelárie je konštantný. Výkon konvektorových jednotiek resp. teplovodných ohrievačov je pokladaný tiež za konštantu a pri opise je spolu s vonkajšou teplotou považovaný za poruchu v systéme. Mnohorozmerný systém je opísaný sústavou šiestich diferenciálnych rovníc (uvedené budú následne iba dve). Z hľadiska riadenia je za výstupnú veličinu považovaná

teplota vzduchu v danej miestnosti a riadiacou veličinou je teplota privádzaného vzduchu pri konštantnom objemovom prietoku. Jednotlivé miestnosti sú v rovniciach (3.2) a (3.3) indexované podľa polohy $x \in \{S, L, P, H, D, B\}$ (S-stredná, L-ľavá, P-pravá, H-horná, D-dolná, B-bočná). Prvý člen v každej rovnici zodpovedá konštantnému výkonu konvektora, druhý člen konvekcie tepla, tretí prechodu tepla do vonkajšieho prostredia a ďalších päť prechodom tepla do susedných miestností.

$$c_p \rho V_S \frac{dT_S}{dt} = P_S + c_p \rho Q_S (T_{IS} - T_S) + k_o S_{S1} (T_o - T_S) + k_B S_{S2} (T_D - T_S) + k_S S_{S3} (T_B - T_S) + k_B S_{S4} (T_H - T_S) + k_S S_{S5} (T_L - T_S) + k_S S_{S6} (T_P - T_S) \quad (3.2)$$

$$c_p \rho V_L \frac{dT_L}{dt} = P_L + c_p \rho Q_L (T_{IL} - T_L) + k_o S_{L1} (T_o - T_L) + k_B S_{L2} (T_V - T_L) + k_S S_{L3} (T_V - T_L) + k_B S_{L4} (T_V - T_L) + k_S S_{L5} (T_V - T_L) + k_S S_{L6} (T_S - T_L) \quad (3.3)$$

Pričom T_o je vonkajšia teplota, T_V je konštantná teplota vedľajšej neopisovanej miestnosti, c_p je merná tepelná kapacita vzduchu, ρ je hustota vzduchu, V_x je objem jednotlivých miestností, S_{xi} plochy miestností, P_x je výkon konvektora resp. teplovodného ohrievača, k_o je súčiniteľ prestupu tepla okna, k_B je súčiniteľ prestupu tepla betónovej dosky (betón, izolácia, drevená podlaha), k_S je súčiniteľ prestupu tepla stien. Po úprave a zlúčení konštant možno sústavu rovníc zapísať do stavového priestoru $\dot{x} = Ax + Bu$; $y = Cx + F$ (3.4) pričom F je vektor spomínaných porúch, $x = T_x$, $u = T_{ix}$ a $x = y$.

Zmena teploty v jednotlivých miestnostiach vplyvom susednej miestnosti (koeficienty K_{xS} a K_{Sx}) je rádovo zhodná s vplyvom akčnej veličiny (koeficienty b_{xA}). Je však nutné podotknúť, že rozsah akčnej veličiny (teplota privádzaného vzduchu) sa pohybuje v rozmedzí 15 až 35 °C, pričom teplota susediacej miestnosti sa v takomto rozsahu za normálnych podmienok nemení. Pri porovnateľných teplotách susediacich miestnostiach a teplote privádzaného vzduchu je pri danom prietoku vplyv akčnej veličiny násobne väčší ako vplyv susediacej miestnosti. Ak by bolo potrebné zvýšiť teplotu v miestnosti o jeden stupeň a na ohrev by sa podieľal iba privádzaný vzduch o stupeň vyšší ako teplota miestnosti, tretinu výkonu by dodala

$$\begin{aligned}
\dot{x} &= Ax + bu + F \\
y &= cx
\end{aligned}$$

$$A = \begin{pmatrix} -K_{SS} & K_{SL} & K_{SP} & K_{SH} & K_{SD} & K_{BS} \\ K_{LS} & -K_{LL} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_{PS} & 0 & -K_{PP} & 0 & 0 & 0 \\ K_{HS} & 0 & 0 & -K_{HH} & 0 & 0 \\ K_{DS} & 0 & 0 & 0 & -K_{DD} & 0 \\ K_{BS} & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_{BB} \end{pmatrix}; x = \begin{pmatrix} T_S \\ T_L \\ T_P \\ T_H \\ T_D \\ T_B \end{pmatrix}; u = \begin{pmatrix} T_{IS} \\ T_{IL} \\ T_{IP} \\ T_{IH} \\ T_{ID} \\ T_{IB} \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

$$b = \begin{pmatrix} b_{SA} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_{LA} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{PA} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{HA} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_{DA} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{BA} \end{pmatrix}; c = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; F = \begin{pmatrix} K_{PS} + K_S \\ K_{PL} + K_L \\ K_{PP} + K_P \\ K_{PH} + K_H \\ K_{PD} + K_D \\ K_{PB} + K_B \end{pmatrix}$$

miestnosť za predpokladu, že by bol v nej vzduch vyšší tiež o jeden stupeň Celzia. Vedľajšia miestnosť by sa však samozrejme ochladila. Zvyšovaním prietoku sa vplyv na zmenu teploty v miestnosti zväčšuje a podiel vplyvu susediacich miestnosti klesá. Pri zadanom prietoku (100 m³/h) a rozmeroch kancelárie (48,125 m³) sa vzduch vymení približne 2-krát za hodinu, čo je v rozmedzí bežne používaného rozsahu. Keďže kancelária susedí so piatimi ďalšími miestnosťami, vplyv okolia na danú miestnosť nie je v porovnaní s vplyvom akčnej veličiny zanedbateľný. Je však dôležité poznamenať, že tepelné zisky susedných miestností vplývajú iba do vyrovnania teplôt, kým zásah akčnej veličiny je obmedzený len limitnou hodnotou teploty privádzaného vzduchu. Zo vzťahov možno dedukovať zásadný vplyv poruchy reprezentovanej vektorom F , t.j. teplota vonkajšieho vzduchu, výkon vykurovacích telies, teplotu okolitých nemodelovaných miestností. V prípade neschopnosti vykurovacích telies pokryť tepelné straty do okolia nadobúda vektor F záporné hodnoty. Vplyv týchto konštánt je rádovo neporovnateľný s vplyvom akčnej veličiny, respektíve vplyvom okolitých miestností. Teplovodné ohrievače sú však dimenzované na pokrytie tepelných strát do vonkajšieho prostredia pri extrémnych teplotách. Pri vonkajšej teplote -20 °C sa koeficienty vektora F znížia o jeden rád. Vo vykurovacej sezóne má zložka vektora F najbadateľnejší vplyv na teplotu v miestnosti a tým aj na okolité miestnosti. (taktiež pri chladení, keď je tepelný tok z vonkajšieho prostredia výrazný). Otázkou zostáva ako riadiť vzájomne previazanú sústavu bez toho, aby akčný zásah regulátora v jednej miestnosti negatívne neovplyvnil teplotu v druhej miestnosti a to najmä v prípadoch, kedy koeficienty prestupu tepla medzi miestnosťami nadobúdajú vyššie hodnoty. (napríklad pri použití presklených priečok).

3.3 Riadenie tepelnej sústavy

Mnohorozmerný systém obsahujúci iteračné väzby je z hľadiska riadenia autonómny vtedy, ak každá zo vstupných riadiacich veličín ovplyvňuje len jednu výstupnú riadenú veličinu. Snaha autonómne regulovať mnohorozmerný systém je prirodzená, keďže vzájomné ovplyvňovanie výstupných veličín môže viesť k nestabilite systému, preregulovaniu, plytvaniu zdrojov potrebných na akčný zásah resp. k neudržaniu želanej hodnoty. Autonómnosť mnohorozmerného systému sa zabezpečuje zavedením vhodného kompenzátoru, v literatúre známy pod názvom Decoupling control system. Z rovníc (3.2) až (3.3) a zo stavového opisu (3.4) si možno všimnúť, že stavové veličiny (T_S ; T_L ; T_P ; T_H ; T_D ; T_B) sú zároveň výstupmi systému. Deriváciou jednotlivých výstupných veličín dostávame funkčnú závislosť na vstupných premenných (T_{IS} ; T_{IL} ; T_{IP} ; T_{IH} ; T_{ID} ; T_{IB}). Princíp osamostatnenia jednotlivej dvojice vstup-výstup spočíva v eliminácii výrazov obsahujúcich ďalšie stavové veličiny vyskytujúce sa v prvej derivácii (keďže systém je relatívneho rádu jeden). Tento princíp sa používa pri vstupno-

výstupnej linearizácii, pri ktorej sa vstupný signál u navrhuje tak, aby eliminoval nelineárne výrazy a systém sa navonok tváril ako lineárny. Keďže opisovaný systém lineárnym je, snaha bude navrhnúť vstup u tak, aby eliminoval vzájomné väzby v systéme. Pre navrhnutý vstup v, pre ktorý platí rovnosť $\dot{y} = \dot{x} = v$, by prenosové funkcie šiestich autonómnych systémov mali tvar $F_i(s) = \frac{Y_i(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{s}$. Ak je však žiaduce, aby sa systém správal, ako systém prvého rádu s časovou konštantou T a zosilnením K , potom prenosová funkcia bude mať tvar $F_i(s) = \frac{Y_i(s)}{V_i(s)} = \frac{K_i}{T_i s + 1}$. Z rovnosti $T_i \dot{y} + y = K_i v$ a z $\dot{y} = \dot{x}$ pre vstupy u pri zanedbaní porúch platia nasledovné rovnosti (3.5) až (3.6).

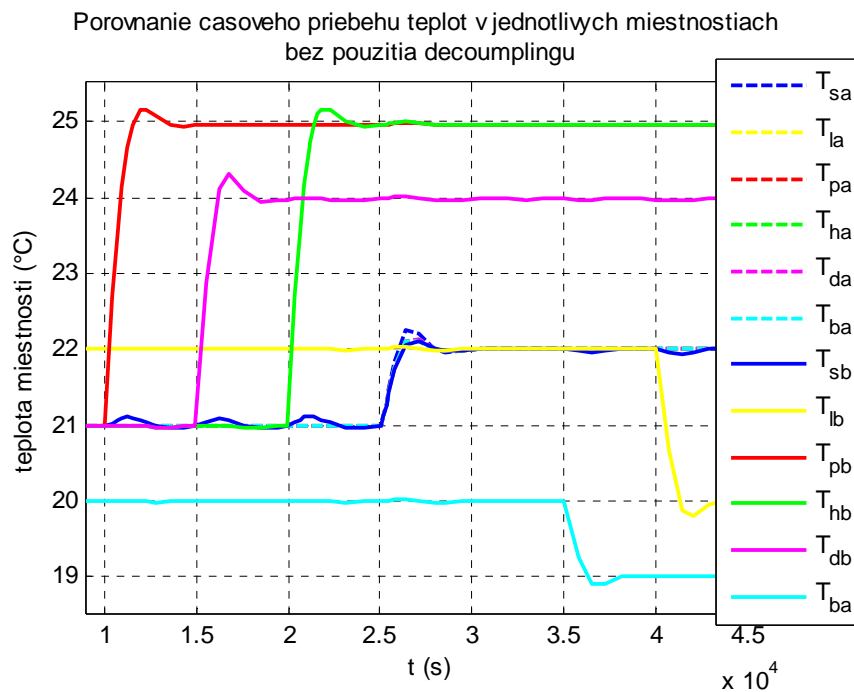
$$u_1 = \frac{K_1}{T_1 b_{SA}} v_1 - \frac{(1 - T_1 K_{SS})}{T_1 b_{SA}} y_1 - \frac{K_{SL}}{b_{SA}} y_2 - \frac{K_{SP}}{b_{SA}} y_3 - \frac{K_{SH}}{b_{SA}} y_4 - \frac{K_{SD}}{b_{SA}} y_5 - \frac{K_{SB}}{b_{SA}} y_6 \quad (3.5)$$

$$u_2 = \frac{K_2}{T_2 b_{LA}} v_2 - \frac{K_{LS}}{b_{LA}} y_1 - \frac{(1 - T_2 K_{LL})}{T_2 b_{LA}} y_2 \quad (3.6)$$

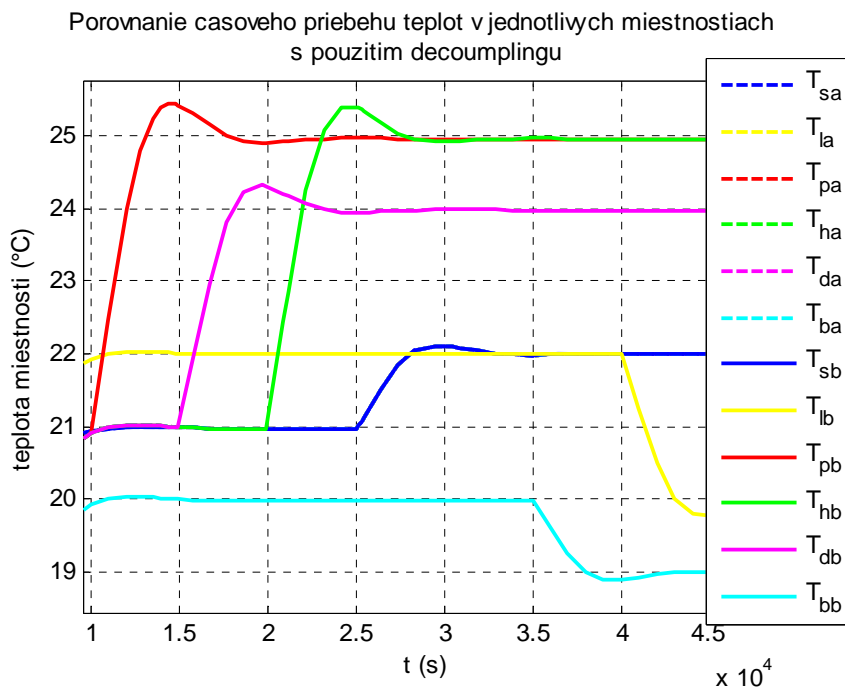
Po dosadení rovníc (3.5) až (3.6) do rovníc (3.2) a (3.3) sa bude systém šiesteho rádu správať ako šesť nezávislých lineárnych systémov prvého rádu s poruchou F (uvedené sú len dve rovnice zo šiestich). Dôležitou úlohou je správne zvoliť časové konštanty T_i a zosilnenia K_i . Možno povedať, že ich výber je ľubovoľný. Ak by však boli konštanty zvolené nesprávne, regulátor pri obmedzenom akčnom zásahu nemusel byť schopný dosiahnuť želanú hodnotu vstupnej veličiny. Preto sa konštanty volia tak, aby prenosová funkcia opisovala systém tak, ako by naňho nevlývali žiadne väzby ani poruchy. Z rovníc (3.2) a (3.3) teda možno napísať pre $x \in \{S, L, P, H, D, B\}$ a $i \in \{1; 6\}$ vyjadrenie jednotlivých časových konštánt a zosilnení (3.7).

$$c_p \rho V_x \frac{dT_x}{dt} = c_p \rho Q_x (T_{Ix} - T_x) \rightarrow \frac{T_x(s)}{T_{Ix}(s)} = \frac{Y_i(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{\frac{V_x}{Q_x} s + 1} \rightarrow K_i = 1; T_i = \frac{V_x}{Q_x} \quad (3.7)$$

Pre daný model, mala časová konštantá hodnotu $T_i = 1718,8$ s. Na obr. č. 11 a č. 12 sú znázornené časové priebehy výstupnej veličiny (teploty miestností) v dvoch prípadoch. V prvom prípade je skok žiadanej veličiny všetkých miestností v čase $2,5 \times 10^4$ s z 21°C na 22°C vyznačený čiarkovanou čiarou, ktorú pre prekrytie šiestich čiar nevidieť. V druhom prípade je vyvolávaná zmena žiadanej veličiny vo všetkých okolitých miestnostiach. Ako vidieť zmeny boli vykonané v časoch 1; 1,5; 2; 2,5, 3,5 a 4 10^4 s. Ako vidieť na obr. č. 11, pri akejkoľvek zmene želanej veličiny susediacej miestnosti sa táto zmena prejaví výkyvom teploty. Pri použití decouplingu a pomyselného odstránenia väzieb na obr. č. 12 nevidieť na výstupnej veličine žiaden negatívny prejav previazanosti systému. Zjavne nejde o výrazný prechod teploty, ale pri zníženom prietoku, napríklad v čase útlmu, kedy nemá akčná veličina ovplyvňovanej miestnosti taký dôrazný vplyv na reguláciu sa prechody teploty zväčšujú. Taktiež pri zle zvolených parametroch zónového regulátora môžu mať kmity teploty spôsobené zmenami stavov susedných miestností negatívny vplyv na akčné členy radiaceho obvodu. Zistené skutočnosti môžu mať priaznivý vplyv na odstránenie väzieb medzi miestnosťami, a to hlavne v budovách, kde je preväzbenie miestností zjavnejšie (sklenené priečky, steny s vysokým koeficientom prechodu tepla). Pri riadení mnohorozmerného systému sa nastoľuje otázka zistenia optimálnych parametrov regulátorov, ktoré by zabezpečovali udržanie autonómnosti systému. Je potrebné uvedomiť si, že pri autonómnom systéme síce vstup neovplyvňuje výstup nespárovaného výstupu, ale akčný zásah na udržanie tejto nezávislosti musí regulátor nespárovaného výstupu vygenerovať. Regulátor musí byť schopný reagovať na zmeny vlastnej žiadanej hodnoty a zároveň reagovať na zmeny okolitých systémov rešpektujúc obmedzenia akčnej veličiny. Na zistenie optimálnych parametrov šiestich PI regulátorov boli použité spomenuté genetické algoritmy.



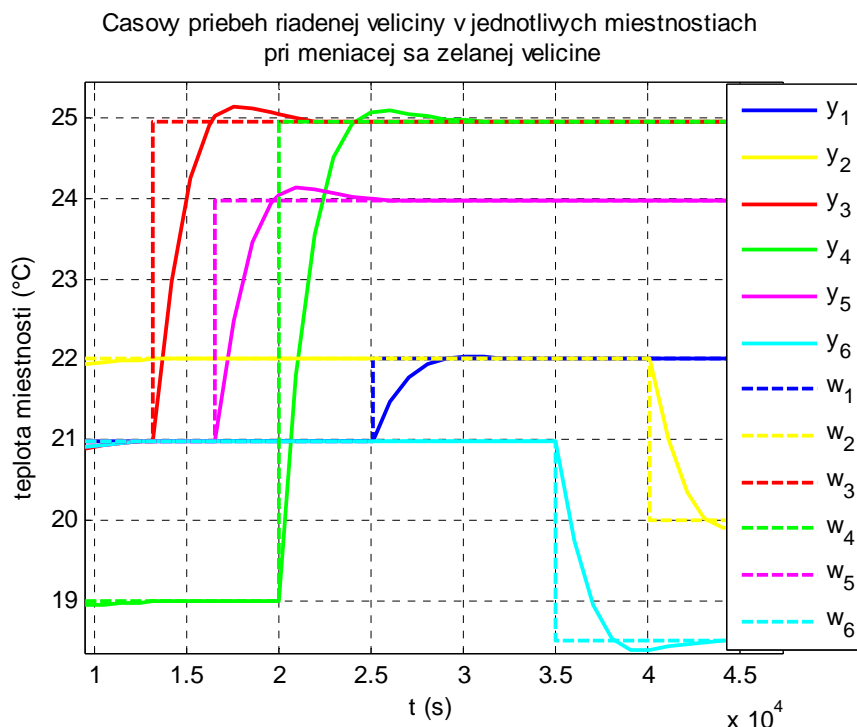
Obrázok č. 11: Porovnanie časového priebehu teplôt v jednotlivých miestnostiach bez použitia decouplingu pri rôznych hodnotách želanej veličiny



Obrázok č. 12: Porovnanie časového priebehu teplôt v jednotlivých miestnostiach s použitím decouplingu pri rôznych hodnotách želanej veličiny

Pri hľadaní bola použitá populácia iba s piatimi členmi, ktorá však postačovala, keďže prehľadávaný priestor bol dostatočne ohraničený. Ako v prípade zisťovania parametrov regulátora riadiaceho otáčky ventilátora, bol pri výbere do ďalšej populácie použitý elitizmus, hoci v menšej miere a turnajový výber. Miera mutácie bola znížená na hodnotu 0,1. Účelová

funkcia mala opäť všeobecný tvar, pričom bolo potrebné zohľadniť všetkých šesť regulátorov. Funkcia bola doplnená pokutovou funkciou, ktorá penalizovala jedincov, ktorý pri regulácii prekročili absolútnu hodnotu regulačnej odchýlky 2 °C. Vyšetrované boli dva modelové príklady, t.j. zmena žiadanej teploty v miestnostiach v rovnakú chvíľu a na rovnakú hodnotu a prípad meniacich sa želaných teplôt okolitých miestností v rôznych časových okamihoch. Priebehy výstupnej veličiny pri skokových zmenách želanej veličiny sú pre druhý popisovaný prípad zobrazené na obr. č. 13. Obr. č. 13 poukazuje na regulačnú schopnosť regulátora reagovať na skokové zmeny žiadaných hodnôt jednotlivých miestností, ako aj účinne reagovať na zmenu teploty susednej miestnosti. Akčný zásah bol obmedzený hodnotami 15°C a 35°C, pričom regulačný obvod disponoval antiwindupovým zapojením. Optimalizované parametre regulátorov v druhom prípade: $P_1 = 1$; $P_2 = 0,95$; $P_3 = 0,95$; $P_4 = 0,95$; $P_5 = 0,95$; $P_6 = 0,95$; $I_1 = 0,0008$; $I_2 = 0,001$; $I_3 = 0,001$; $I_4 = 0,0008$; $I_5 = 0,001$; $I_6 = 0,001$.



Obrázok č.13: Časové priebehy riadenej veličiny pri skokovej zmene žiadanej teploty, prípad II.

Optimalizáciu parametrov regulátorov je potrebné zopakovať hlavne pri zmene zosilnenia systému, ktorú spôsobuje napr. zmena teploty vykurovacej (tá sa zvyčajne mení v závislosti od vonkajšej teploty) resp. chladiacej vody (tá sa však mení menej často). Potreba aktualizácie parametrov vzniká i pri zmene prietoku prírodného vzduchu, kedy sa mení časová konštanta systému. Genetický algoritmus na simulačnom modeli môže prebiehať na dispečerskom pracovisku, kde je pomocou aktualizovaných vstupných premenných možné cez komunikačnú sieť upraviť parametre regulátorov. Je však potrebné myslieť na výpočtovú náročnosť pri optimalizácii skupín (napr. poschodí) obsahujúcich väčší počet miestností. Odlišný pohľad na reguláciu ponúka skupina algoritmov, ktoré využívajú model procesu na určenie budúceho chovania sa procesu, v literatúre známe ako prediktívne riadenie.

4 Prediktívne riadenie

Odstránenie vzájomných väzieb medzi subsystémami sa zjavne prejavilo na kvalite regulácie. Pomocou genetických algoritmov boli určené parametre PI regulátorov, ktoré sú schopné reagovať na zmenu žiadanej teploty regulovanej zóny ako aj na zmenu tepelných podmienok susediacich miestností. Vzájomná nezávislosť riadiacich a riadených veličín modelovaných systémov dovoľuje použiť široké spektrum metód riadenia, ktoré v porovnaní s PI reguláciou poskytujú špecifické výhody. Jednou z nich je aj prediktívne riadenie, ktoré dovoľuje do riadiaceho algoritmu zahrnúť modelovanú poruchu, obmedzenia, plánovaný priebeh žiadanej hodnoty, pokutovú funkciu. Nasledujúce kapitoly predostroú základné princípy MPC (Model predictive control) regulátora ako aj rozšírenia uspôsobené na problematiku zónového riadenia teploty.

4.1 Zovšeobecnené prediktívne riadenie

Medzi prediktívnymi algoritmi je najznámejšia jeho zovšeobecnená forma (GPC – Generalized Predictive Control). Bola navrhnutá pánom Clarke v osemdesiatych rokoch 20. storočia a získala si svoje miesto v mnohých oblastiach riadenia priemyselných aplikácií i v akademickej obci. Základnou myšlienkou GPC je výpočet sekvencie N_u (horizont riadenia) budúcich riadiacich zásahov na základe minimalizácie účelovej funkcie definovanej na zvolenom horizonte predikcie $N_2 - N_1$ (N_2 – horizont predikcie, N_1 – počiatkový horizont). Najviac používanou je kvadratická účelová funkcia, minimalizujúca súčet kvadrátov budúcich regulačných odchýlok a budúcich riadiacich prírastkov. Predikovaný výstup je pri lineárnych systémoch zložený z dvoch zložiek, voľnej a riadenej odozvy systému. Voľná odozva (free response) je reakciou systému na minulé vstupy v prípade, že akčný zásah ostal bezo zmeny, riadená odozva (force response) je odozva systému na predikované riadiace veličiny. Aj keď sa v každej perióde vzorkovania vypočítava vektor riadiacich prírastkov pre celý horizont riadenia, použije sa len prvá z vypočítaných hodnôt. V ďalšom kroku sa na základe aktualizovaných údajov opäť minimalizáciou účelovej funkcie v rámci horizontu predikcie vypočíta sekvencia riadiacich prírastkov a použije sa prvá z vypočítaných hodnôt. Takýmto spôsobom sa do systému vnesie spätná väzba. Na opis systémov uvažujme CARIMA model [8] (Controlled Autoregressive Integrating Moving Average model) daný vzťahom (4.1).

$$A(z^{-1})y(k) = z^{-d}B(z^{-1})u(k-1) + \frac{C(z^{-1})}{\Delta}e(k) \quad (4.1)$$

Pričom $y(k)$ výstupná veličina, $u(k)$ je riadiaca vstupná veličina, $e(k)$ je biely šum, polynóm $C(z^{-1})$ je kvôli zjednodušeniu rovný 1, $\Delta = 1 - z^{-1}$, d je oneskorenie, polynómy $A(z^{-1})$ a $B(z^{-1})$ reprezentujúce systém majú tvar (4.2).

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_naz^{-na} \\ B(z^{-1}) &= b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_nbz^{-nb} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Sekvencia budúcich riadiacich prírastkov je generovaná na základe minimalizácie účelovej funkcie v tvare (4.3).

$$J = \sum_{j=N_1}^{N_2} \lambda_y(j) [\hat{y}(k+j|k) - w(k+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda_u(j) [\Delta u(k+j-1)]^2 \quad (4.3)$$

Pričom N_1 a N_2 je počiatkový resp. predikčný horizont, N_u je horizont riadenia, $\lambda_y(j)$ a $\lambda_u(j)$ sú sekvencie váhových koeficientov, $\Delta u(k) = (1 - z^{-1})u(k)$, $\hat{y}(k+j|t)$ je optimálna predikcia výstupnej veličiny systému o j krokov napred na základe aktuálnych údajov v kroku k . Predikcia výstupu $\hat{y}(k+j|t)$ o j krokov vpred bez odvodu nadobúda tvar (4.4). Pričom indexované matice A a B sú maticami konštant, obsahujúce koeficienty polynómov systému (4.2).

$$\hat{y}_f = -A_f^{-1}A_p y_p + A_f^{-1}B_p \Delta u_p + A_f^{-1}B_f \Delta u_f \quad (4.4)$$

4.2 Riadiaci algoritmus

Minimalizáciu účelovej funkcie (4.3) s využitím zjednodušeného zápisu (4.4) možno dosiahnuť postavením gradientu funkcie rovného nule.

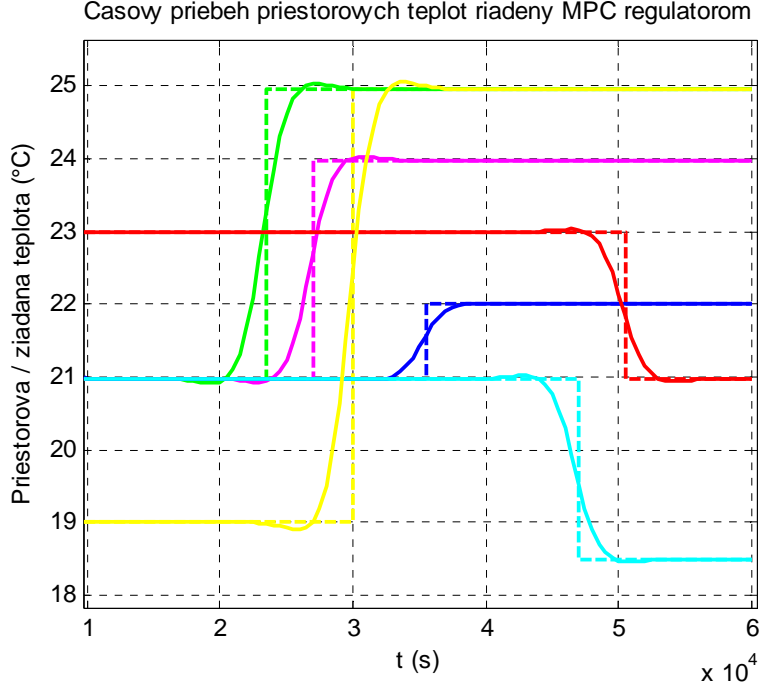
$$\frac{\partial J}{\partial \Delta u_f} = -2(G^T \Lambda_y G + \Lambda_u) \Delta u_f + 2G^T \Lambda_y (F y_p + H \Delta u_p - w_f) = 0 \quad (4.5)$$

Pričom Λ_y a Λ_u sú diagonálne váhové matice rozmeru $N \times N$, $w_f = [w(k+1); w(k+2); \dots; w(k+N)]$ je vektor budúcich hodnôt referenčného signálu rozmeru $N \times 1$. Zo vzťahu (4.16) možno vyjadriť vzťah na výpočet vektora budúcich riadiacich prírastkov (4.6), z ktorých sa reálne použije len prvý člen vektora. Výpočet sa opakuje s aktualizovanými hodnotami každú periódu vzorkovania.

$$\begin{aligned} \Delta u_f &= -K^{-1} [G^T \Lambda_y (F y_p + H \Delta u_p - w_f)] \\ K &= G^T \Lambda_y G + \Lambda_u \end{aligned} \quad (4.6)$$

Uvedený vzťah na výpočet riadiaceho signálu je uvedený bez uvažovania obmedzení a bez uvažovania pôsobiacej poruchy. Vo vzťahu (4.6) vystupuje vektor budúcich hodnôt referenčného signálu, čo je jeden z najväčších benefitov prediktívneho riadenia zónovej regulácie teploty. Na obr. č. 14 je vidieť časové priebehy výstupných veličín i akčných zásahov pri horizonte predikcie $N_2=20$ a horizonte riadenia $N_u=20$. Pre váhové matice $\Lambda_y=I\lambda_y$ a $\Lambda_u=I\lambda_u$, kde I je jednotková diagonálna matica rozmeru 20×20 boli zvolené hodnoty koeficientov $\lambda_y=5$, $\lambda_u=8$. Z obrázka vidieť, že riadiaci impulz začne pôsobiť pred tým ako dôjde k zmene referenčného signálu. Charakter prechodu riadenej veličiny medzi rôznymi hodnotami referenčného signálu je daný najmä hodnotami váhových koeficientov a dĺžky horizontu riadenia a horizontu predikcie. Zvyšovaním hodnoty koeficientu λ_y sa zvyšuje požiadavka na presnosť sledovania referenčného signálu. Intuitívne tiež platí, že zvyšovaním hodnoty koeficientu λ_u sa zvyšuje požiadavka na efektivitu použitých akčných členov.

Výber dĺžky horizontu predikcie a horizontu riadenia má zásadný vplyv na výpočtovú náročnosť ako aj na kvalitu regulácie. Pri výbere dĺžky horizontu je potrebné zahrnúť hodnotu časovej konštanty systému ako aj obmedzenia riadiacej veličiny. Voľbe váhových koeficientov sa bude venovať samostatná kapitola. Model (4.1) ako aj riadiaci algoritmus (4.6) nezahŕňa vo svojej štruktúre vplyv poruchy. Ako bolo vo vzťahoch (3.2) až (3.3) ozrejmené za poruchu možno pokladať náhlu zmenu vonkajšej teploty (napr. v prípade letných búrok), zapnutie konvektora s daným výkonom, otvorenie okna. Na to, aby bol prediktívny regulátor schopný reagovať na externú poruchu, v našom prípade merateľnú a predvídateľnú poruchu, je potrebné opísať vplyv poruchy na systém napr. prenosovou funkciou a zahrnúť ju do štruktúry riadenia. Nasledujúca kapitola sa venuje modelovanej poruche spôsobenej zmenou teploty vonkajšieho vzduchu. Porucha je v rámci horizontu predikcie a riadenia považovaná za predpovedateľnú.



Obrázok č. 14: Časový priebeh priestorových teplôt riadený MPC regulatorom

4.3 Merateľná porucha v GPC

Opis systému vychádza z model (4.1) a je doplnený poruchovou veličinou $p(k)$. Modifikovaný model nadobúda tvar (4.7).

$$A(z^{-1})y(k) = z^{-d}B(z^{-1})u(k-1) + z^{-dp}D(z^{-1})p(k) + \frac{C(z^{-1})}{\Delta}e(k) \quad (4.7)$$

Zo vzťahu (4.7) vyplýva prenosová funkcia poruchy, ktorá v našom prípade nadobúda jednoduchý tvar (4.8) s polynómom $D(z^{-1})$ obsahujúcim jediný člen.

$$\frac{T_x(z^{-1})}{p(z^{-1})} = \frac{D(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{d_1 z^{-1}}{1 + A_1 z^{-1}} \quad (4.8)$$

Predikovaný výstup je možné z tvaru (4.4) prepísať do tvaru (4.9), pričom matica D_f obsahuje koeficienty polynómu $D(z^{-1})$.

$$\hat{y}_f = -A_f^{-1}A_p y_p + A_f^{-1}B_p \Delta u_p + A_f^{-1}B_f \Delta u_f + A_f^{-1}D_f \Delta p_f \quad (4.9)$$

Po dosadení vzťahu (4.9) do účelovej funkcie a jej minimalizáciou s ohľadom na Δu_f , dostávame pre výpočet sekvencie budúcich riadiacich prírastkov vzťah (4.10), kde $F = -A_f^{-1}A_p$, $H = A_f^{-1}B_p$, $G = A_f^{-1}B_f$, $J = A_f^{-1}D_f$.

$$\Delta u_f = -K^{-1} [G^T \Lambda_y (F y_p + H \Delta u_p + J \Delta p_f - w_f)] \quad (4.10)$$

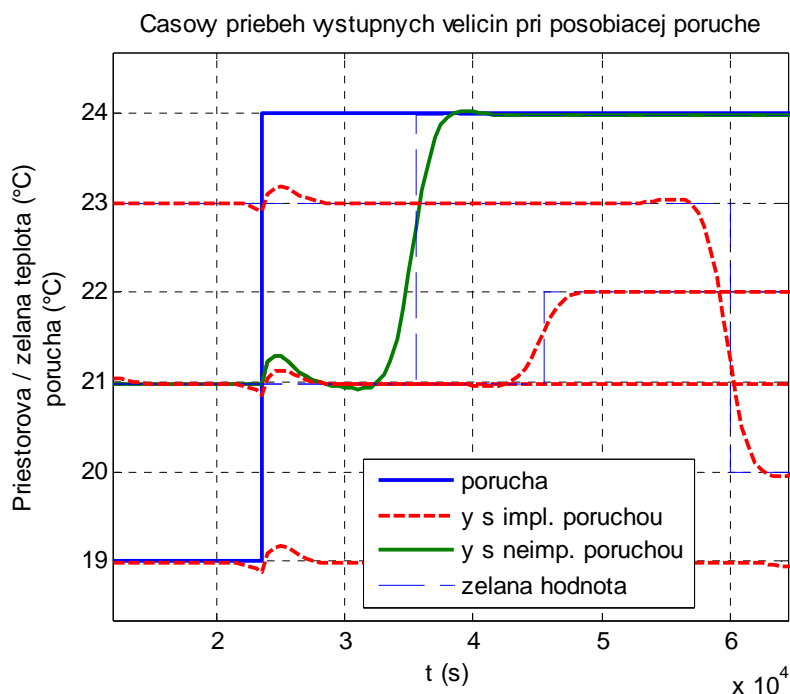
$$K = G^T \Lambda_y G + \Lambda_u$$

Pre simulačné účely spojitú prenosovú funkciu zo vzťahu (3.7) nadobúdali s číselnými konštantami z kapitoly 3.2 diskretný tvar $F_s(z^{-1})$ a prenosové funkcie porúch $F_p(z^{-1})$ (4.11).

Jediný člen polynómu $D(z^{-1})$ je pre päť miestností majúcich kontakt s vonkajšou fasádou takmer identický, vo vzťahu (4.11) je uvedený koeficient pre centrálnu miestnosť.

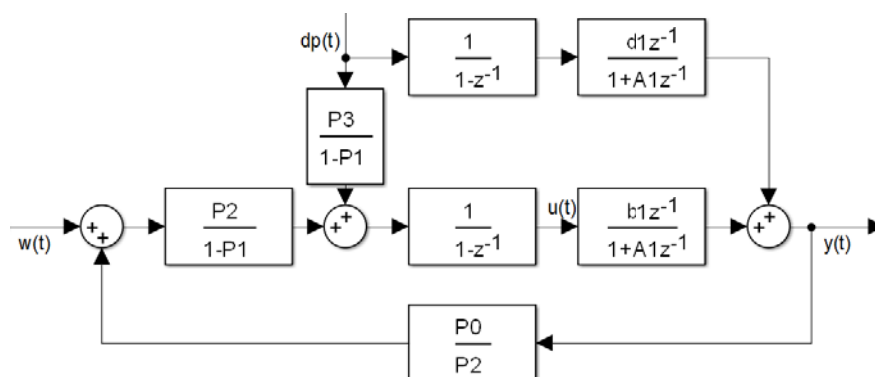
$$F_s(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{0,2524z^{-1}}{1 - 0,7476z^{-1}}; \quad F_p(z^{-1}) = \frac{D(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{0,03069z^{-1}}{1 - 0,7476z^{-1}} \quad (4.11)$$

Na obr. č. 15 vidieť vplyv poruchy na časový priebeh regulovanej priestorovej teploty.



Obrázok č. 15: Časový priebeh výstupných veličín pri pôsobiackej poruche

Časové priebehy vykreslené čiarkovanou červenou čiarou majú do riadiaceho algoritmu implementovanú maticu J ako aj informáciu o prichádzajúcej poruche. Časový priebeh vykreslený zelenou plnou čiarou zobrazuje použitie MPC regulátora bez zohľadnenia poruchy. Je zrejmé, že zohľadnenie poruchy v regulácii až taký výrazný vplyv na jej elimináciu nemá. Príčinou tohto neuspokojivého výsledku je fakt, že MPC regulátor sa nespráva ako klasický dopredný kompenzátor [14]. V zhode s klasickým regulátorom so spätnou väzbou a dopredným kompenzátorom možno prediktívny regulátor vyjadriť blokovou schémou na obr. č. 16. Polynómy P sú tvorené členmi vzťahu vyjadrujúceho predikciu riadiaceho inkrementu zo (4.10).



Obrázok č. 16: Bloková schéma späťvazobného GPC regulátora s kompenzátorom poruchy

Ideálny kompenzátor by bol realizovaný vydelením prenosovej funkcie poruchy $F_p(z^{-1})$ prenosovou funkciou systému $F_s(z^{-1})$ zo vzťahu (4.11) a opačným znamienkom [14], z čoho dostávame vzťah (4.12).

$$\frac{F_p(z^{-1})}{F_s(z^{-1})} = -\frac{D(z^{-1})A(z^{-1})}{B(z^{-1})A(z^{-1})} = -\frac{D(z^{-1})}{B(z^{-1})} = -\frac{0,0307}{0,2524} = -0,1216 \quad (4.12)$$

Hodnote zo vzťahu (4.12) by sa teda mal rovnať kompenzátor poruchy $\frac{P_3}{1-P_1}$. Pri znalosti polynómov $A(z^{-1}), B(z^{-1}), D(z^{-1})$ (4.11) možno zapísať vzťah (4.13). (Pozn.: Polynóm P_3 obsahuje ďalších 9 členov, ale po zaokrúhlení na 2 desatinné miesta sú nulové)

$$\frac{P_3}{1-P_1} \cong \frac{-0.06 - 0.04z - 0.02z^2 - 0.01z^3}{1} \quad (4.13)$$

Ako vidieť zo vzťahu (4.13), kompenzátor nenadobúda želaný tvar daný podielom (4.12). Kvôli tejto nerovnosti je akčný zásah generovaný skôr ako je porucha reálne detegovaná, čo jasne vidieť aj na obr. č. 15. Rovnosť výrazov (4.12) a (4.13) však možno zabezpečiť zmenou váhových matíc. Kvôli osamostatneniu príspevku poruchy do prírastku akčného zásahu je zvolená nulová hodnota referenčného signálu a zároveň je systém v ustálenom stave, možno pre predikovaný akčný inkrement podľa (4.10) napísať vzťah (4.14).

$$\Delta u_f = -(G^T \Lambda_y G + \Lambda_u)^{-1} [G^T \Lambda_y J \Delta p_f] \quad (4.14)$$

Je zjavné, že pri rovnosti $\Lambda_u = 0$ sa matice $G^T \Lambda_y$ navzájom eliminujú a vzťah na výpočet sekvencie riadiacich inkrementov nadobúda tvar (4.15), ktorý korešponduje s klasickým tvarom dopredného kompenzátora.

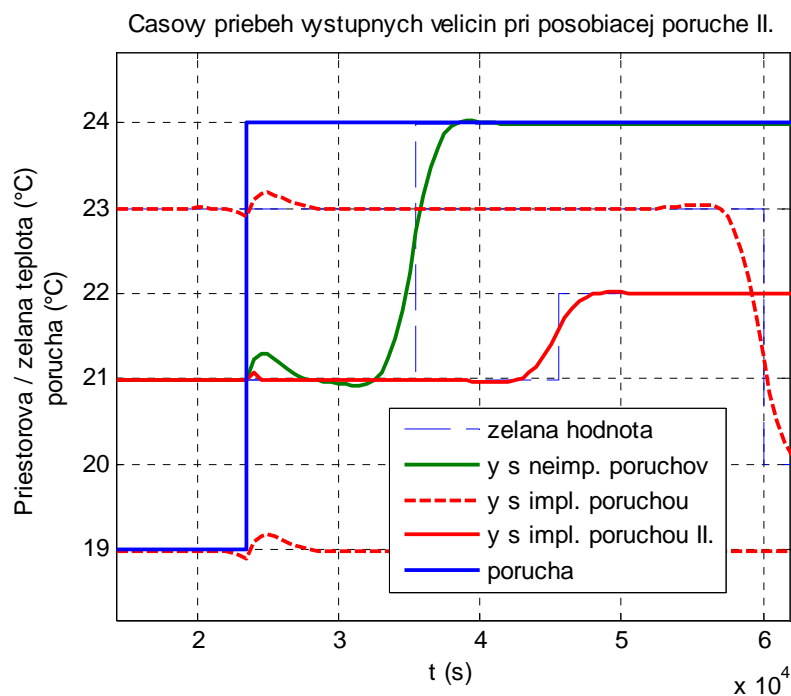
$$\Delta u_f = -G^{-1} J \Delta p_f = -(A_f^{-1} B_f)^{-1} A_f^{-1} D_f \Delta p_f = -B_f^{-1} D_f \Delta p_f, \quad (4.15)$$

Pri voľbe $\Lambda_u = 0$ sa podiel polynómov z (4.13) zmení na požadovaný tvar (4.16) v zhode s podielom (4.12).

$$\frac{P_3}{1-P_1} = \frac{-0,1216}{1} \quad (4.16)$$

Obr. č. 17 demonštruje zlepšenie kvality regulácie pri pôsobiacej chybe. Červené čiarkované priebehy zobrazujú časové priebehy priestorovej teploty regulované prediktívnym regulátorom s kompenzátorom a nenulovou hodnotou váhovej matice Λ_u , časový priebeh teploty regulovaný regulátorom bez zahrnutia vplyvu poruchy je zobrazený zelenou plnou čiarou a použitie nulovej hodnoty váhovej matice Λ_u v prediktívnom regulátore zobrazuje priebeh regulovanej veličiny označenej červenou plnou čiarou.

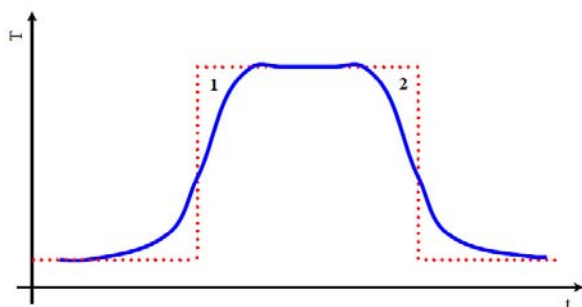
Ako vidieť regulátor bol schopný takmer úplne eliminovať poruchu. Čím vyššia je hodnota váhovej matice Λ_u tým viac sa prejavujú účinky matice J a ako je zjavné zo vzťahu (4.13) nenulové hodnoty koeficientov P_3 pri vyšších mocninách komplexnej premennej z spôsobujú prírastky riadiacej veličiny skôr ako sa porucha vyskytne. Nastavenie nulovej hodnoty koeficientov penalizujúcich inkrement akčného zásahu však spôsobuje agresívne správanie regulátora a systém je citlivý na vysokofrekvenčný šum a na nepresnosti modelu. V praxi sú agresívne skokové zmeny riadiacej veličiny nerealizovateľné a to hlavne pri požiadavke na skokovú zmenu teploty prírodného vzduchu. Obmedzeniam riadiacej a riadenej veličiny sa venuje samostatná kapitola. Pri požiadavke eliminovať prichádzajúcu poruchu je však možné nastavenie nulovej váhovej matice obmedziť iba na požadovanú dobu, aby tak toto



Obrázok č. 17: Časový priebeh výstupných veličín pri pôsobiaci poruche II.

nastavenie nespôsobovalo problémy pri zmene referenčného signálu. Keďže porucha je pokladaná za predpovedateľnú, matica Λ_u je nulová len v tom prípade, že v horizonte riadenia sa deteguje nenulová hodnota diferencie poruchy. Váhová matica taktiež ostáva nulovou po dobu dĺžky horizontu riadenia od poslednej detekcie nenulovej diferencie poruchy. Je to kvôli tomu, aby sa regulátor dokázal počas tejto doby vysporiadať s doznievajúcou poruchou. Čas rovnajúci sa dĺžke horizontu riadenia od poslednej zaznamenanej zmeny poruchovej veličiny je považovaný za dostatočný. V prípade súčasnej detekcie zmeny referenčného signálu sa nastavenie váhovej matice opätovne vráti do nenulových hodnôt. Príkladom je priebeh riadenej teploty označenej červenou plnou čiarou na obr. č. 17, kde po eliminácii poruchy nasleduje zmena referenčného signálu. Prechod medzi želanými stavmi je plynulý, bez prekmitov a skokovej zmeny akčného zásahu. Pri porovnaní obr. č. 13 a obr. č. 14 možno pozorovať výrazný časový rozdiel, za ktorý je schopný regulátor dosiahnuť požadovanú hodnotu. Vhodnému načasovaniu regulácie s ohľadom na dosiahnutie žiadanej teploty v presne požadovanom čase sa venuje nasledujúca kapitola.

4.4 Profil obsadenosti



Obrázok č. 18: Časový priebeh regulovanej veličiny MPC regulátorom pri zmene žiadanej hodnoty [15]

Na rozdiel od klasického PI regulátora, ktorý reaguje na zmenu žiadanej hodnoty v čase kedy nastala, prediktívny regulátor generuje akčný zásah na základe predikovanej riadenej veličiny s ohľadom na minimalizáciu kriteriálnej funkcie. Preto je akčný zásah generovaný v čase pred reálnou zmenou referenčného signálu. Tvar prechodu medzi jednotlivými úrovňami referenčného signálu je u PI regulátora daný nastavením proporčnej a integračnej zložky u MPC regulátora dĺžkou horizontu predikcie

a riadenia a hodnotami koeficientov váhových matíc Λ_u a Λ_y . Pri vzájomne vyvážených hodnotách matíc Λ_u a Λ_y nastáva situácia zobrazená na obr. č. 18. Prediktívny regulátor reaguje na zvýšenie žiadanej hodnoty síce v predstihu, ale reálne ju dosiahne až po určitom čase. Totožná situácia sa deje pri znížení žiadanej hodnoty, kedy MPC regulátor začne akčným zásahom vplývať na systém skôr ako je zmena požadovaná. Napriek výhodám MPC regulátora predikovať výstup systému, regulácia nedokáže zabezpečiť žiadanú hodnotu v požadovaných medziach. Jednou s možností ako mierne eliminovať oblasti 1 a 2 na obr. č. 18 je zvyšovanie hodnoty koeficientov váhovej matice Λ_y , ktorá penalizuje regulačnú odchýlku. Zvyšovanie koeficientov váhových matíc má však vplyv na stabilitu systému. Definovaním profilu obsadenosti a úpravou algoritmu je možné stabilnou reguláciou dosiahnuť referenčný signál v presne definovanom čase. Profil obsadenosti možno definovať ako jednoduchý binárny signál (4.17), ktorého hodnoty sa menia podľa časového programu obsadenosti priestoru.

$$\begin{aligned} \gamma(k+j) &= 1, & k+j \in \text{obsadená miestnosť}, & \forall j \in \{N_1, \dots, N_2\} \\ \gamma(k+j) &= 0, & k+j \in \text{neobsadená miestnosť} & \forall j \in \{N_1, \dots, N_2\} \end{aligned} \quad (4.17)$$

Literatúra [17] uvádza použitie tohto signálu pri zmene priority váhových matíc účelovej funkcie a to tak, že v prípade obsadenosti priestoru sa matici Λ_y zvýšia hodnoty koeficientov, prípadne sa čase neobsadenosti priestoru použije iba váhová matica Λ_u a matica Λ_y bude nulová. Táto zmena penalizačných koeficientov však nezabezpečuje dosiahnutie referenčného signálu v požadovanom čase. Základná myšlienka algoritmu tkvie vo výbere koeficientov váhových matíc, ktoré zabezpečia stabilitu systému, ako aj kvalitu regulácie a primerané zaťaženie akčných prvkov. Tento výber koeficientov je následne použitý pri generovaní predikcie výstupu. Z obr. č. 14, 15, 17 vidieť, že riadená veličina sa pri zmene referenčného signálu s týmto signálom pretína približne v polovici svojho prechodu. Takýto priebeh je želaný, je však potrebné tento priebeh uskutočniť o niekoľko krokov skôr. Posun predikovaného výstupu je realizovaný nasledovným postupom.

1. Na základe vopred známeho priebehu referenčného signálu je podľa horizontu predikcie vytvorených $N_2 - N_1$ referenčných signálov, z ktorých má každý postupne posunutý posledný prvok na predošlé pozície ako to je zobrazené na príklade (4.18), pri $N_2 - N_1 = 4$.

$$\begin{aligned} w_f(1) &= [23 \ 23 \ 23 \ 24] \\ w_f(2) &= [23 \ 23 \ 24 \ 24] \\ w_f(3) &= [23 \ 24 \ 24 \ 24] \\ w_f(4) &= [24 \ 24 \ 24 \ 24] \end{aligned} \quad (4.18)$$

2. Sú určené matice konštánt F , H , G , J a taktiež sú definované váhové matice Λ_y a Λ_u , ktoré spĺňajú požiadavky na kvalitu a stabilitu systému.

3. V cykle je na základe minimalizácie pokutovej funkcie podľa (4.6) resp. (4.10) určených $N_2 - N_1$ predikovaných riadiacich vektorov a následne podľa (4.4) resp. (4.9) $N_2 - N_1$ predikcií výstupnej veličiny. Jednotlivé predikcie výstupnej veličiny odpovedajú v čase posunutým priebehom referenčného signálu.

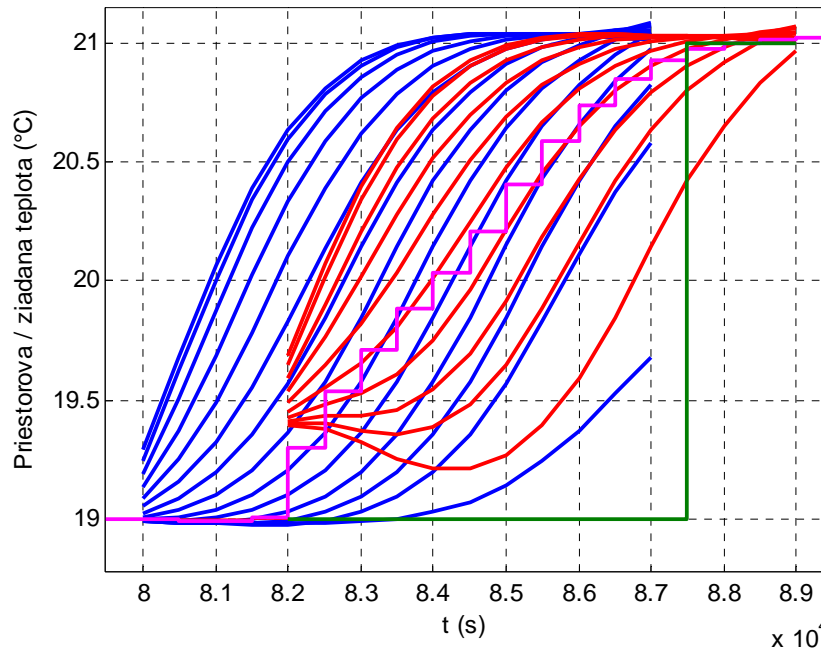
4. Predikované vstupy a výstupy sú následne porovnávané s reálnym referenčným signálom, pričom penalizácia regulačnej odchýlky je aktívna iba pri aktívnom signáli obsadenosti γ . Pokutová funkcia J_w (4.19) obsahuje taktiež váhové koeficienty δ_y a δ_u , ktorými je vyjadrená miera priority riadenia.

5. Na základe minimálnej hodnoty pokutovej funkcie J_w sa vyberie predikcia výstupu najlepšie kopírujúca priebeh referenčného signálu od momentu jeho zmeny. Z vektora prislúchajúceho akčného zásahu je použitý len prvý člen.

$$J_w(i) = \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta_y |\hat{y}(i,j) - w_f(i,j)| \gamma(j) + \sum_{j=1}^{N_u} \delta_u |\Delta u(i,j)| \quad \text{pre } i \in \langle 1, \dots, N_2 - N_1 \rangle \quad (4.19)$$

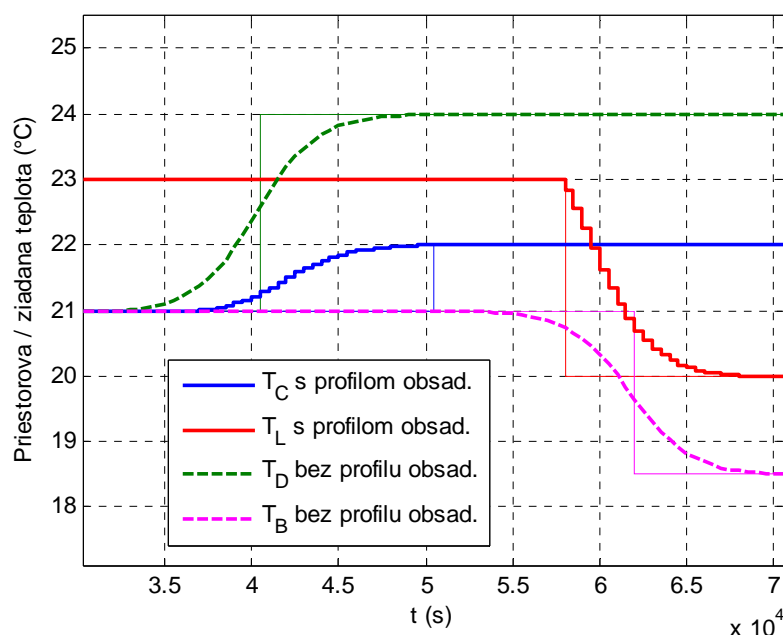
6. Postup výpočtu akčného zásahu sa opakuje pri každej ďalšej iterácii.

Na obr. č. 19 je zobrazený časový priebeh referenčného signálu (zelená farba), výstupná veličina (purpurová farba) a tiež dve sady predikovaných výstupných veličín v rôznych časových okamihoch (modrá a červené farba). Je zjavné, že výstupná veličina v okamihu zmeny referenčného signálu nadobúda totožnú hodnotu. Jednotlivé skupiny predikcií zobrazujú, ako by sa systém správal pri jednotlivých posunutiach skoku referenčného signálu. Na obr. 19 je tiež možné pozorovať deformáciu prvých predikcií označených červenou farbou. Táto deformácia je spôsobená začínajúcim prechodom výstupnej veličiny, ktorý je v čase $8,2 \times 10^4$ s pre klasický algoritmus príliš včasný.



Obrázok č. 19: Predikcie výstupnej veličiny určené pri časovom posune referenčného signálu

Na obr. č. 20 vidieť porovnanie klasického prístupu MPC regulátora, pri zvýšení žiadanej teploty (zelená čiarkovaná čiara) resp. pri znížení žiadanej priestorovej teploty (purpurová čiarkovaná čiara) a MPC regulátora využívajúci znalosť profilu obsadenosti späť so zmenou referenčného signálu (modrá a červená čiara). Je teda zrejmé, že žiadaná teplota sa udržiava v miestnosti presne v želanom vymedzenom čase. Na prvý pohľad sa môže zdať takéto riadenie energeticky náročnejšie, ale v konečnom dôsledku šetrí energetické zdroje. Z obr. 20 si možno všimnúť, že dosiahnutie žiadanej teploty v čase obsadenosti priestoru (napr. pri zmene teploty z 21 °C na 24 °C) trvá viac než hodinu. Tento čas je pre pracovníka, ktorý práve vstupuje do kancelárie kritický. Prvá reakcia je rázna zmena želanéj teploty, mnohokrát na limitne povolenú teplotu. Regulátor sa tak snaží dosiahnuť aktuálnu želanú hodnotu a tak buď podchladí resp. príliš vykúri priestor. Pracovníci sa následne cítia diskomfortne a ako poslednú voľbu volia otvorenie okna,



Obrázok č. 20: Porovnanie časový priebehov priestorových teplôt riadených MPC regulátorom s a bez využitia profilu obsadenosti

čo má za následok zablokovanie regulácie danej zóny a súčasne vplyv na susediace kancelárie. Tento algoritmus sa však dá tiež využiť na efektívne načasovanie vykurovacej vody resp. prípravu teplej úžitkovej vody. Dispečerskí pracovníci sa často stretávajú s problémom správneho nastavenia časového programu, ktorý by zabezpečil požadovanú hodnotu referenčného signálu na daný čas. Dôsledkom je neefektívne využívanie čerpadiel, nahrievanie primárneho okruhu vykurovania resp. chladiaceho stroja. Uvedený algoritmus však nepočíta s obmedzením riadiacej či riadenej veličiny. Limity najmä riadiacich veličín sú v praxi prirodzenou súčasťou regulácie. Nasledujúca kapitola sa venuje riadiacemu algoritmu zahrňujúcim v sebe definované obmedzenia.

4.5 MPC regulátor s obmedzeniami

Obmedzenia zónovej regulácie súvisia najmä s hygienickými obmedzeniami popísanými v kapitole 1.2 a sčasti s technologickými obmedzeniami, spojenými s kondenzáciou vodných pár na prívodnom chladiacom potrubí, hlavne pri použití chladiacich trémov. Pri zónovej regulácii je teda nutné dodržať minimálnu a maximálnu teplotu prívodného vzduchu a v niektorých prípadoch aj rozdiel medzi teplotou prívodného vzduchu a priestorovou teplotou, čo limituje rýchlosť zmeny riadiacej veličiny. Obmedzenia riadenej veličiny priamo súvisia s tepelným komfortom človeka v miestnosti a mali by byť spriahnuté s obmedzením žiadanej hodnoty. Uvažovať budeme teda nasledujúce obmedzenia (4.20) pre $j = 0 \dots (N_u - 1)$ resp. $j = 0 \dots (N_2 - N_1)$ v snahe dopracovať sa k štandardnému tvaru problému kvadratického programovania. Matice potrebné na zápis obmedzení vychádzajú z [8,18].

$$\begin{aligned}
 u_{min} &\leq u(k+j) \leq u_{max} \\
 |\Delta u(k+j)| &\leq \Delta u_{max} \\
 y_{min} &\leq \hat{y}(k+j) \leq y_{max}
 \end{aligned}
 \tag{4.20}$$

Úpravou dostávame nerovnicu (4.21) s vyjadrením matice C a vektora $c(k)$ (4.22).

$$CU(k + N_u - 1) \geq c(k)
 \tag{4.21}$$

$$C = \begin{bmatrix} I \\ -I \\ I \\ -I \\ G \\ -G \end{bmatrix}; \quad c(k) = \begin{bmatrix} [u_{min} - u(k-1)] \\ u_{min} - u(k-1) \\ \vdots \\ [u_{min} - u(k-1)] \\ - [u_{max} - u(k-1)] \\ u_{max} - u(k-1) \\ \vdots \\ [u_{max} - u(k-1)] \\ - [\Delta u_{max}] \\ \Delta u_{max} \\ \vdots \\ [\Delta u_{max}] \\ - [\Delta u_{max}] \\ \Delta u_{max} \\ \vdots \\ [\Delta u_{max}] \\ [Y_{min} - Y_0(k)] \\ [-Y_{max} + Y_0(k)] \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Matica C je pri nemeniacom sa systéme maticou konštant a vektor $c(k)$ je v každom kroku výpočtu potrebné aktualizovať. Určenie budúceho akčného inkrementu s uvažovaním obmedzení možno dosiahnuť riešením problému kvadratického programovania v štandardnom tvare (4.23), kde x reprezentuje $U(k + N_u - 1)$, matica H_s zastupuje symetrickú Hesseho maticu, vektor g je vektorom gradientu a platia pre nich vzťahy (4.24).

$$\min_x x^T H_s x - g^T x \quad \text{pri } Cx \geq c \quad (4.23)$$

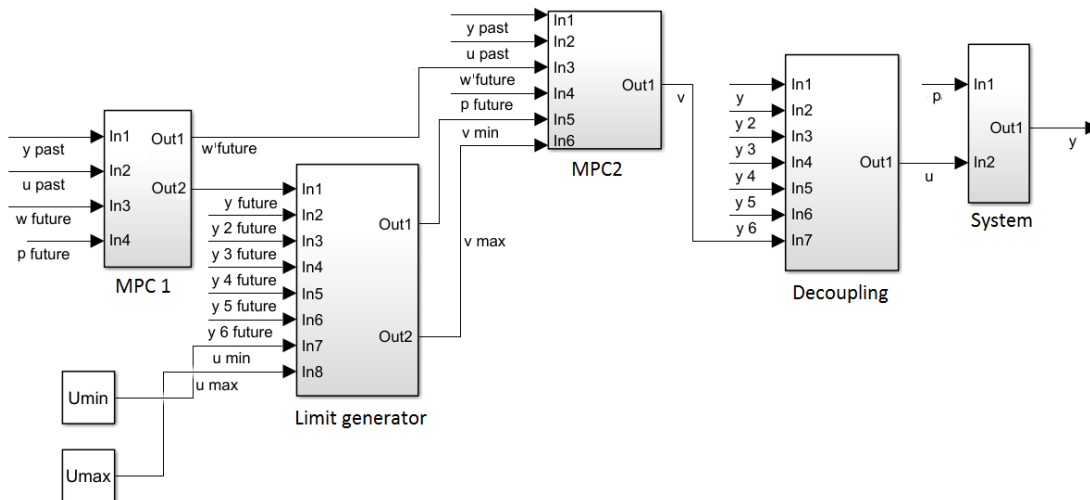
$$H_s = G^T G + \Lambda_u; \quad g = -2G^T \Lambda_y (Y_0(k) - w(k + N_2 - N_1)) \quad (4.24)$$

Optimálne riešenie vektora predikovaných akčných zásahov (bez uvedenia výpočtového algoritmu) bolo získané pomocou simulačného prostredia Matlab, konkrétne pomocou funkcie quadprog. Obmedzenie riadiacej veličiny pre všetky uvažované susedné miestnosti bolo zadané v intervale $\langle 15,40 \rangle$ °C, obmedzenie riadenej veličiny v intervale $\langle 18,28 \rangle$ °C. Zapracovanie obmedzenia do riadiaceho algoritmu pre samostatný subsystém nie je problémom. Treba si však uvedomiť, že vypočítaná hodnota akčného zásahu MPC regulátora je signálom v a reálny akčný zásah u je určený vzťahmi (3.5) a (3.6). Zo zvolených limitných intervalov je teda potrebné určiť obmedzenia veličiny v , dodržaním ktorých MPC regulátor zabezpečí aj dodržanie obmedzenia reálneho akčného zásahu u . Na výpočet obmedzení veličiny v je nutná prirodzene znalosť budúcich hodnôt výstupných veličín všetkých okolitých miestností. MPC1 regulátor každej zóny najprv určí najhodnejšiu predikciu výstupu podľa pokutovej funkcie (4.19), aby bola zabezpečená želaná hodnota v presne požadovanom čase. Ak má regulátor k dispozícii predikcie susedných miestností môže jednoducho určiť limity pre pomyselné akčné zásahy v . Vzťahy (4.25), (4.26) obsahujú konštanty c_{xx} , ktoré sú zjednotením konštant z vzťahov (3.5) a (3.6) (uvedený je len výpočet limitov pre centrálnu a vedľajšiu miestnosť).

$$\begin{aligned} v_{1min} &= u_{1min} + c_{11}y_{f1} + c_{12}y_{f2} + c_{13}y_{f3} + c_{14}y_{f4} + c_{15}y_{f5} + c_{16}y_{f6} \\ v_{1max} &= u_{1max} + c_{11}y_{f1} + c_{12}y_{f2} + c_{13}y_{f3} + c_{14}y_{f4} + c_{15}y_{f5} + c_{16}y_{f6} \\ v_{1min} &\leq v_{f1} \leq v_{1max} \end{aligned} \quad (4.25)$$

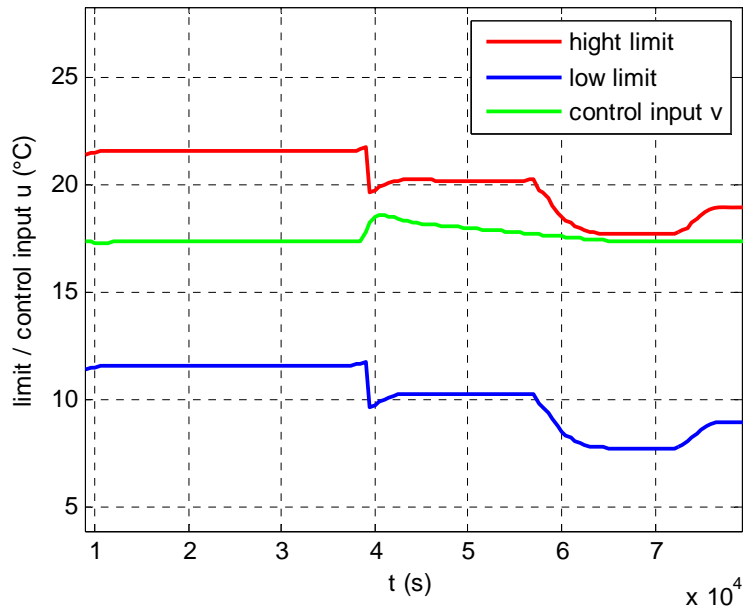
$$\begin{aligned}
v_{2min} &= u_{2min} + c_{21}y_{f1} + c_{22}y_{f2} \\
v_{2max} &= u_{2max} + c_{21}y_{f1} + c_{22}y_{f2} \\
v_{2min} &\leq v_{f2} \leq v_{2max}
\end{aligned}
\tag{4.26}$$

Do MPC2 regulátora vstupujú minimálne i maximálne limit pomyselných regulačných zásahov v_{mix} a v_{max} , limity danej regulovanej veličiny a podobne ako s limitami regulačných zásahov v možno postupovať i s limitami minimálne a maximálnej zmeny pomyselného regulačného zásahu Δv . Spolu s týmito limitami je do MPC2 regulátora vstupuje i v čase posunutý referenčný signál. MPC2 regulátor určí na základe riešenia problému kvadratického programovania riadiaci zásah v rešpektujúc obmedzenia. Reálne riadiace zásahy u sú určené podľa vzťahov (3.5) a (3.6), pričom rešpektujú limity u_{mix} a u_{max} . Na obr. č. 21 vidieť schematické zobrazenie MPC regulátora riadiaceho kanceláriu obklopenú piatimi miestnosťami. Regulátor po komunikačnej sieti získava informácie o predikcii priestorových teplôt susedných miestností, ich aktuálnu hodnotu, predikciu poruchy, referenčného signálu, signálu o obsadení miestnosti a na základe vypočítaných limitov a aktuálnej priestorovej teploty riadenej zóny generuje akčný zásah, pričom zachováva zvolené obmedzenia.



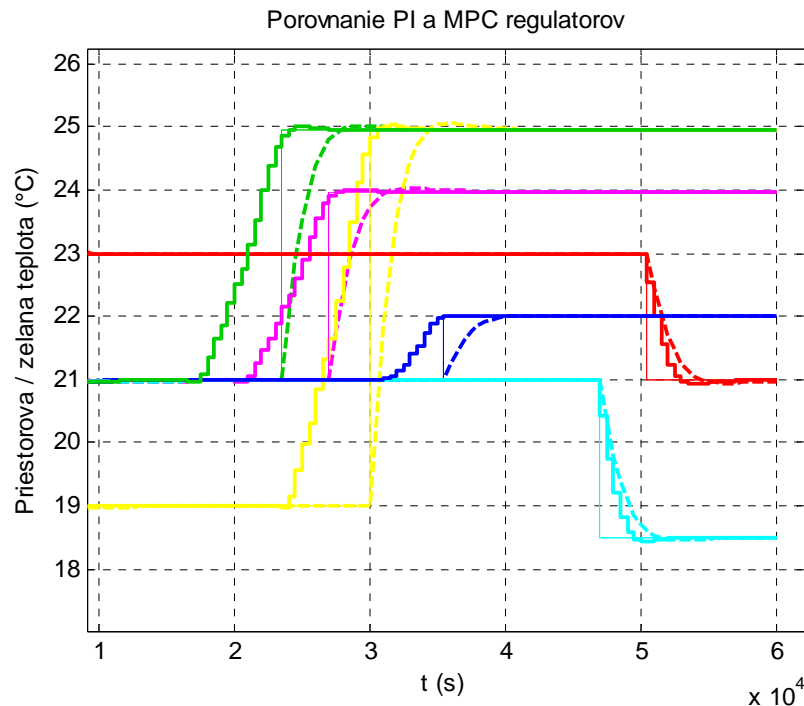
Obrázok č. 21: Schematické zobrazenie zónového MPC regulátora rešpektujúceho obmedzenia a merateľnú poruchu

Obr. č. 22 zobrazuje časový priebeh meniacich sa obmedzení pomyselného riadiaceho zásahu v . Približne v čase $3,9 \times 10^4$ s pri postupnej zmene priestorovej teploty z hodnoty 21°C na 22°C sa limitné hodnoty znížia, keďže podľa vzťahu (4.25) pri zvýšení hodnoty riadenej veličiny sa pri zachovaní limitov u_{min} a u_{max} musí zabezpečiť znížená hodnota signálu v , keďže hodnota koeficientu $c_{11} = \frac{(1-T_1K_{SS})}{T_1b_{SA}}$ je pri číselnom vyjadrení záporná. V čase $5,8 \times 10^4$ s pri znížení priestorovej teploty susednej miestnosti je tiež nutné upraviť limit signálu v , keďže pri generovaní reálneho akčného zásahu u sa pri znížení príspevkov od susedných miestností podľa (3.5) (pri kladných koeficientoch c_{1x}) automaticky musí znížiť aj limit signálu v . Ako vidieť pri zmene teploty susednej miestnosti sa nemení hodnota signálu v , táto zmena sa prejaví až pri reálnom akčnom zásahu u . Takýmto spôsobom je zabezpečené obmedzenie akčných zásahov v jednotlivých miestnostiach s ohľadom na príspevky okolitých priestorov. Na obr. č. 23 je zobrazené porovnanie klasického PI regulátora (čiarkované čiary) a MPC regulátora využívajúceho profil obsadenia miestnosti. Ako vidieť, časové priebehy riadených veličín pri klasickom PI regulátore nadobúdajú želanú hodnotu po viac ako 1,5h, čo je pre pracovníka kancelárie vnímané ako diskomfort, hlavne v prípade, že je rozdiel medzi ako je pracovník



Obrázok č. 22: Meniace sa limity pomyselného riadiaceho zásahu

ochotný strpieť. Nedochádza teda k okamžitej zmene žiadanej hodnoty na zónovom ovládači, čo zásadne ovplyvní spotrebu energie budovy. Takýto MPC regulátor taktiež zabezpečuje udržanie želanej teploty až do konca pracovnej smeny na rozdiel od klasickej formy MPC regulátora. Taktiež si možno všimnúť, že zmeny priestorových teplôt susedných priestorov nemajú na regulovanú zónu vďaka decouplingu vplyv. Vplyvom poruchy, v podobe zmeny vonkajšej teploty a vplyvom ekvitermickej regulácie vykurovacej vody na zónovú reguláciu sa zaoberá nasledujúca kapitola.



Obrázok č. 23: Porovnanie časových priebehov výstupných veličín riadených klasickým PI regulátorom a MPC regulátorom využívajúceho profil obsadenosti teploty

5 Vplyv centrálného vykurovacieho systému a ekvitermická regulácia

Ekvitermická regulácia patrí medzi najrozšírenejšie formy regulácie vykurovacích sústav. Teplota vykurovacej vody sa riadi podľa krivky, ktorá je závislá od vonkajšej teploty. Tvar krivky, jej strmosť a posun závisí od tepelnoizolačných vlastností budovy, jej orientácie, nadmorskej výšky, lokality a výkonnosti vykurovacieho systému. Strmosť krivky tiež závisí od teplotného spádu a typu použitých koncových vykurovacích prvkov. Ekvitermické krivky sú určované na základe pozorovania a skúseností no môžu byť optimalizované napr. fuzzy logikou. Nevýhodou použitia ekvitermickej regulácie je hlavne v prechodných obdobiach problém s nedokúrením, resp. prekúrením objektu v dôsledku nezohľadnenia reálnej požiadavky na kúrenie. Skúsenosť dispečerských pracovníkov je pri takejto forme riadenia nevyhnutná, keďže dokážu krivkám meniť strmosť ako aj posun po osi x. Medzi výhody patrí aj možnosť použitia separátnych vetiev regulovaných na rôzne krivky, hlavne ak je v budove použitých viacero typov vykurovacích telies. (napr. okruh radiátorov a okruh konvektorov resp. fancoilov). Pri náhlej zmene teploty vzduchu, najmä po búrke, alebo pri zmene poveternostnej situácie dochádza k zvýšeniu, resp. zníženiu teploty vykurovacej vody, čo má vplyv na výkon koncových vykurovacích prvkov. Schopnosť MPC regulátora poradiť si so zmenou teploty vykurovacej vody je predmetom štúdia nasledujúcej kapitoly.

5.1 MPC regulátor pod vplyvom ekvitermickej regulácie

Kvôli možnosti pozorovať vplyv zmeny teploty vykurovacej vody na kvalitu regulácie je nutné za riadiacu veličinu stanoviť polohu ventilu. Vzťah medzi doteraz používanou riadiacou veličinou (teplota prírodného vzduchu fancoilu) a novozavedenou riadiacou veličinou možno odvodiť z rovnice tepelnej bilancie (5.1) predpokladajúc, že sa tok tepla odvádzaný z jednej tekutiny (vykurovacia voda - index 1) rovná toku tepla privádzaného do druhej tekutiny (prúdiaci vzduch z fancoilu - index 2) v tepelne izolovanom výmenníku. Ako koncové zariadenie je teda opäť použité zariadenie s konštantným prietokom vzduchu ohrievaným resp. chladeným centrálnym rozvodom.

$$\begin{aligned} M_1 \Delta h_1 &= M_2 \Delta h_2 \\ Q_1 \rho_1 c_{p1} \Delta T_1 &= Q_2 \rho_2 c_{p2} \Delta T_2 \end{aligned} \quad (5.1)$$

Pričom M je hmotnostný tok prúdiaceho vzduchu, resp. vykurovacej vody, h je entalpia médií, Q objemový tok, c_p merná tepelná kapacita, ρ hustota vzduchu, resp. vody a ΔT teplotná diferencia. Tak ako pri predošlých simuláciách je prietok prírodného vzduchu Q_1 konštantný. Teplotný spád vykurovacej vody ΔT_2 pri danej účinnosti predpokladajme tiež za konštantný. Teplotná diferencia ΔT_1 je rozdielom teploty prírodného vzduchu u a konštantnej teploty čerstvého upraveného vzduchu T_{vzt} distribuovaného centrálnou vzduchotechnikou. Prietok vykurovacej vody je regulovaný pozíciou ventilu u' ovládaným servopohonom. Predošlá riadiaca veličina je potom daná vzťahom (5.2), kde Q_{2n} je nominálny prietok vykurovacej vody. Rovnica je doplnená koeficientom účinnosti výmenníka η , závislého od teplotného spádu vykurovacej vody.

$$u = \frac{\Delta T_2 c_{p2} Q_{2n}}{c_{p1} Q_1} \eta u' + T_{vzt} \rightarrow u = Z u' + T_{vzt} \quad (5.2)$$

Po dosadení (5.2) do (3.2) a (3.3) sa systému mení zosilnenie a v stavovom zápise (3.4) sa zmena prejaví vo vynásobení matice b koeficientom Z a úpravou matice konštant F. Pri zachovaní požiadavky na dynamiku vzájomne nezávislých systémov (3.7) je nutné upraviť rovnice (3.5) a (3.6) vydelením ich pravých strán koeficientom Z.

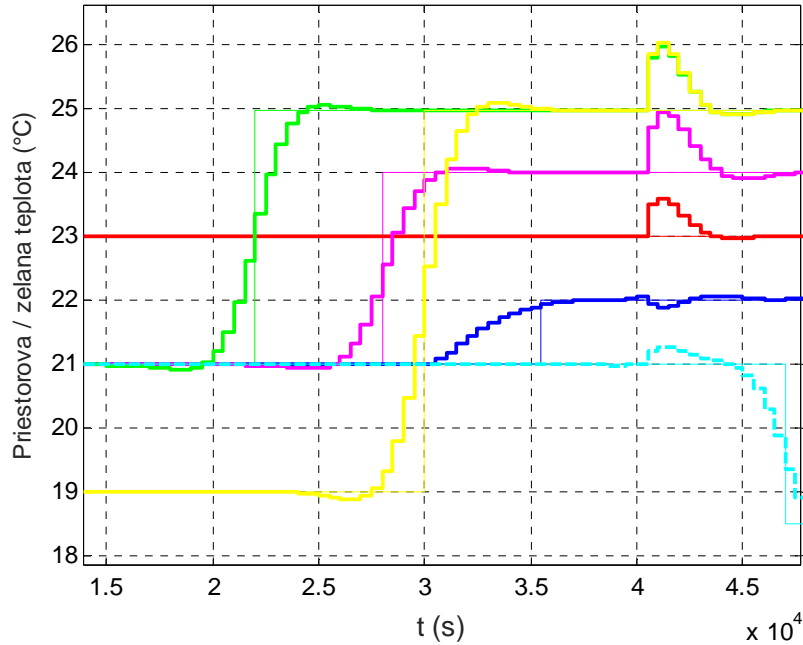
Pozn.: Podľa vzťahu (3.7) by zosilnenie jednotlivých subsystémom K malo byť vynásobené koeficientom Z, subsystémy však chceme zachovať s konštantným zosilnením a to hlavne kvôli absencii nutných priebežných výpočtov konštantných matic H, G potrebných pri generovaní akčného zásahu MPC regulátora. Uvažovanie tohto zosilnenia by sa viedlo k nutnosti skúmať stabilitu systému a prispôbovať váhové koeficienty pri každej zmene teplotného spádu vykurovacej vody.

Riadiacou veličinou u' sa stáva pozícia hriadeľa ventilu pracujúca v rozsahu 0 až 100%. Prirodzene sa nastuľuje otázka, ako na zmenu vykurovacej vody zareagovať, aby bol vplyv na riadenú veličinu čo možno najnebadateľnejší. V kapitole (4.3) je opísaný vplyv poruchy reprezentovaný zmenou vonkajšej teploty. Zosilnenie prenosovej funkcie poruchy voči výstupu bolo závislé na koeficiente prestupu tepla okna a jeho plochy, zatiaľ čo porucha reprezentovaná zmenou vykurovacej vody späť taktiež s vonkajšou teplotou má zosilnenie závislé od strmosti ekvitermickej krivky, účinnosti výmenníka a prietoku privádzaného vzduchu. Z toho vyplýva, že táto porucha bude mať na výstupnú veličinu výraznejší vplyv. Zmena teploty vykurovacej vody v kotolni, resp. výmenníkovej stanici nastáva v porovnaní s periódou vzorkovania (500s) ihneď. Pri návrhu prediktívneho regulátora s merateľnou poruchou je tiež potrebné analyzovať vplyv časového oneskorenia medzi zaznamenanou zmenou vonkajšej teploty a zmenou teploty vykurovacej vody pri koncovom prvku. Časové oneskorenie je spôsobené distribúciou vykurovacieho média, ktoré je dané rýchlosťou prúdenia kvapaliny a dĺžkou distribučnej vetvy od zdroja tepla ku koncovému prvku. Rýchlosť prúdenia kvapaliny sa jednoducho určí zo zadaného prietoku a prierezu danej rúry. Pri simuláciách a modelovanom priestore na 4. nadzemnom podlaží pre vertikálne rozvody s DN100, prietokom $2.54 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ a dĺžkou približne $l_1=15\text{m}$ je dopravné oneskorenie približne 170s. Pri horizontálnom potrubí s DN40 a prietokom $1.27 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ a dĺžkou potrubia $l_2=20\text{m}$ je oneskorenie rovné približne 72 s. Súčet týchto oneskorení nepredstavuje ani polovicu periódy vzorkovania. Z tohto dôvodu s oneskorením spôsobeným transportom média nebudeme uvažovať. V porovnaní s prenosovými funkciami poruchy $F_p(z^{-1})$ z (4.24) je pre šesť susediacich kancelárií zosilnenie v rozmedzí približne 1,5 až 2 násobku pôvodných zosilnení. Vzťahy (5.3) vyjadrujú prenosovú funkciu riadeného systému a prenosovú funkciu poruchy pre centrálnu miestnosť. Číselné vyjadrenie zosilnenia poruchy je vo vzťahu (4.53) pre konkrétnu ekvitermickej krivku, napr. pri výbere posunutej ekvitermickej krivky by sa toto zosilnenie zmenilo.

$$F_s(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{0,2524z^{-1}}{1 - 0,7476z^{-1}}; \quad F_p(z^{-1}) = \frac{D(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{-0,0565z^{-1}}{1 - 0,7476z^{-1}} \quad (5.3)$$

Je potrebné uviesť si, že táto zmena vonkajšej teploty vstupuje do systému ako porucha dvakrát, raz ako porucha vplývajúca na zmenu teploty miestnosti prestupom tepla z vonkajšieho prostredia a raz ako zmena zosilnenia akčnej veličiny. Je prirodzené, že prenosové funkcie týchto dvoch interpretácií porúch majú rozdielne znamienka, keďže vykurovací systém má kompenzovať vplyvy vonkajšej teploty. Ak má byť zmena teploty vykurovacej vody resp. jej teplotný spád zahrnutý do MPC regulátora, je potrebné do vzťahov (4.9) a (4.10) doplniť ďalšiu maticu J obsahujúcu maticu D_f , ktorá je definovaná zosilnením prenosovej funkcie poruchy. Na obr. č. 24 a obr. č. 25 je zobrazený časový priebeh priestorových teplôt a riadiacich veličín pri znížení vonkajšej teploty o 5°C , resp. zmene teploty vykurovacej vody v čase 4×10^4 s.

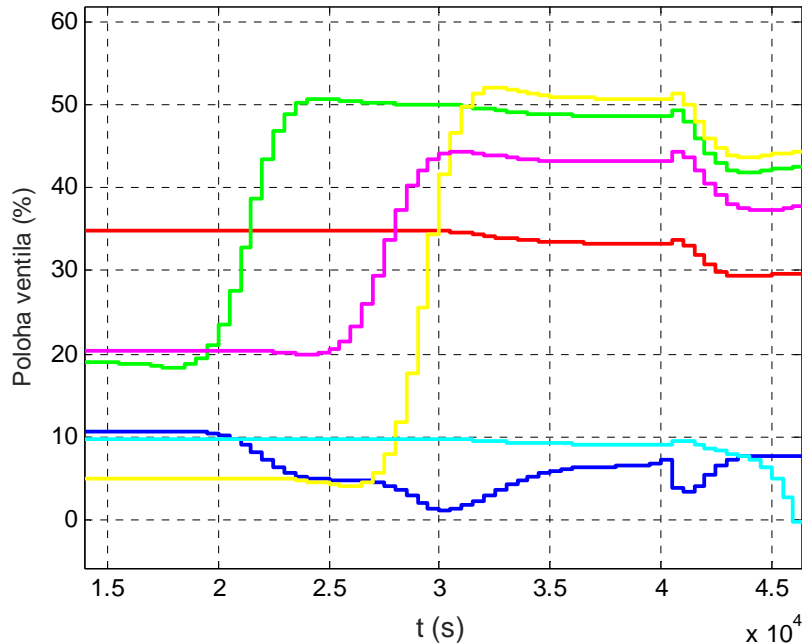
Vplyv zmeny vonkajšej teploty a teploty ustredneho vykurovania na priestorovu teplotu kancelarii



Obrázok č. 24: Časový priebeh priestorových teplôt pri zmene vonkajšej teploty a teploty vykurovacej vody

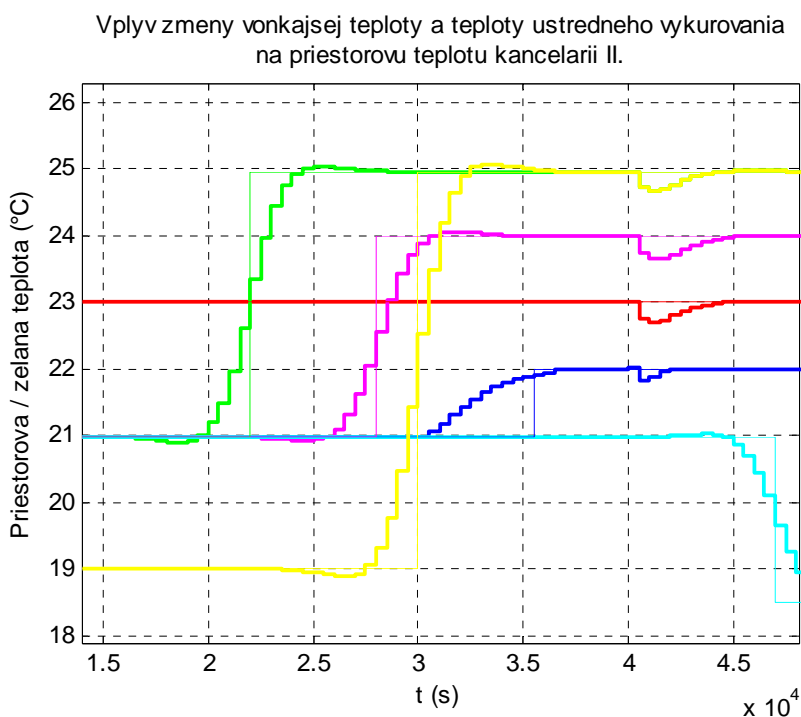
Algoritmus riadenia, ktorý predikuje zmenu teploty vykurovacej vody je implementovaný pre porovnanie iba v centrálnej miestnosti. Ako vidieť pri zmene teploty vykurovacieho média sa síce vyskytuje regulačná odchýlka, ale v porovnaní s ostatnými priebehmi je kvalita regulácie zjavne vyššia. Pri simulácii bolo vplyvom zmeny vonkajšej teploty spôsobené zvýšenie teploty vykurovacej vody, čo zvýšilo účinnosť výmenníka a zvýšilo teplotný spád o 2°C.

Časový priebeh akčných veličín pri zmene vonkajšej teploty a teploty ustredneho vykurovania



Obrázok č. 25: Časový priebeh riadiacej veličiny pri zmene vonkajšej teploty a teploty vykurovacej vody

Regulátorom, ktoré generujú riadiace zásahy zobrazené na obr. č. 25 však nebola aktualizovaná hodnota koeficientu Z (5.2), ktorým sú kvôli zmene riadiacej veličiny vydelené pravej strany rovníc (3.5) a (3.6). Bez tejto aktualizácie generátor reálneho riadiaceho výstupu nekompensuje vplyv okolitých miestností správne. Na obr. č. 36 sú zobrazené časové priebehy riadenej veličiny v systéme, kde je MPC regulátorom aktualizovaný koeficient Z . Generátor reálneho riadiaceho zásahu, zabezpečujúci decoupling, sa tak okamžitou skokovou zmenou zosilnenia postará o zmeny v teplote vykurovacej vody. Akčný zásah nepresahuje limit rýchlosti zmeny pozície tiaha ventila (bežne používané elektropohony určené pre ventily malých dimenzií so zdvihom do 5mm majú rýchlosť zdvihu približne 15mm/s). Pri porovnaní obr. č. 24 a č. 26 si možno všimnúť, že pôsobiaca porucha sa v prvom prípade prejavuje ako záporná a v druhom prípade ako kladná regulačná odchýlka. Je to spôsobené tým, že v prvom prípade prevláda nekompenzovaná porucha spôsobená zvýšením vykurovacej vody, v druhom prípade sa prejavuje pôsobiaca porucha spôsobená znížením vonkajšej teploty. Tá sa samozrejme v krátkom čase kompenzuje, aj vďaka zvýšenému zosilneniu (teplejšej vykurovacej vody). Priebeh priestorovej teploty centrálnej miestnosti vďaka MPC regulátoru s kompenzáciou poruchy vykazuje vyššiu kvalitu regulácie (označená modrou farbou). Vo všeobecnosti však možno povedať, že predpovedať zmenu teploty vonkajšieho vzduchu s dostatočnou kvalitou v horizonte predikcie napr. $N_2=20$ pri vzorkovaní 500s je značne obtiažne. Možno však využiť princíp oneskorenia zmeny teploty vykurovacej vody, kedy pri zmene vonkajšej teploty nenastáva okamžitá zmena žiadanej hodnoty vykurovacej vody, ale ponechá sa priestor na možnosť zareagovať prediktívny regulátor, ktorý zareaguje na blížiacu sa zmenu zosilnenia. Zásadný vplyv na kvalitu regulácie zohľadnenie poruchy reprezentovanú zmenou vykurovacej vody pri tvorbe MPC regulátora vďaka aktualizácii koeficientu Z sa však nepotvrďuje. Tento záver je však podmienený presným zistením koeficientov Z pre ekvitermickú krivku každej vykurovacej vetvy, v opačnom prípade má kompenzácia poruchy MPC regulátorom zmysel.



Obrázok č. 26: Časový priebeh priestorových teplôt pri zmene vonkajšej teploty a teploty vykurovacej vody II.

6 Možnosti využitia nezávislého MPC regulátora

Základným predpokladom na zhodnotenie vhodnosti použitia regulátora, ktorý je schopný eliminovať vplyvy susedných miestností je analýza pôdorysu, v našom prípade administratívnej budovy, z ktorej je potrebné zistiť spoločné plochy medzi miestnosťami, hrúbky stien, resp. sklenených tabúl. Následne je nevyhnutné poznať vzduchové prietoky zabezpečujúce vetranie jednotlivých priestorov ako aj teplotný spád vykurovacej vody a účinnosť koncových prvkov pri jej rôznej teplote. Samozrejme je tiež potrebné poznať tepelnoizolačné vlastnosti budovy, t.j. tepelnú vodivosť, tepelný odpor, hrúbky materiálov a z týchto údajov určiť súčiniteľ prestupu tepla. Dôležitým aspektom posúdenia sú koeficienty (6.1) určujúce mieru vplyvu na zmenu priestorovej teploty, resp. ich vzájomný podiel.

$$e_1 = \frac{c_p \rho Q}{c_p \rho V}; e_{2i} = \frac{k_i S_i}{c_p \rho V}; e_3 = \frac{e_1}{\sum e_{2i}} \quad (6.1)$$

Koeficient e_1 teda určuje mieru vplyvu riadiacej veličiny na teplotu vnútorného prostredia kancelárie. Je závislý od prietoku prírodného vzduchu Q a objemu vzduchových hmôt miestnosti V . Čím je väčší, tým skôr koncový prvok (v našom prípade fancoil, resp. trám) dokáže zabezpečiť zmenu výstupnej veličiny. Koeficienty e_{2i} reprezentujú mieru vplyvu susedných miestností, kde k_i je súčiniteľ prestupu tepla a S_i spoločné plochy. Koeficient e_3 reprezentuje vzájomný pomer vplyvu akčnej veličiny a susedných miestností. Čím je teda koeficient menší, tým má zahrnutie vzájomnej interakcie do regulácie väčší zmysel. Treba mať však na pamäti, že akčná veličina (teplota prírodného vzduchu, resp. percentuálne otvorenie ventila) má rozsah v rozmedzí približne 15 až 35°C resp. 0-100% pričom teplotná diferencia medzi miestnosťami zväčša neprekročí rozpätie medzi minimálnym a maximálnym limitom povoleným pre zadanie žiadanej hodnoty (max 8°C) a postupne sa táto diferencie znižuje. Takáto regulácia je vhodná aj v takých objektoch, kde sa na základe neprítomnosti pracovníkov v miestnostiach aktivuje útlmový režim, resp. v objektoch kde majú pracovníci možnosť otvoriť okno a tým zmeniť priestorovú teplotu, ktorá ovplyvňuje aj susediace kancelárie.

Pri zapnutí resp. vypnutí regulácie na začiatku a konci pracovného dňa je zas vhodné rozšíriť vzájomne sa neovplyvňujúce regulátory o prediktívne riadenie, ktoré pri zadaní pracovného času dokáže zabezpečiť presné načasovanie tak, aby pracovníci mal po celý čas požadovanú teplotu. Z energetického hľadiska ide o podstatnú vec, keďže je u ľudí zvykom, že ak prídu do kancelárie a necítia tepelný komfort od začiatku pracovnej smeny, prestavia žiadanú teplotu na hodnotu, ktorá nezodpovedá ich reálnej požiadavke, ale s cieľom urýchliť proces nábehu tak neúmerne zasiahnu. Následne je priestor prekúrený, resp. podchladený a proces s prestavovaním teploty sa opakuje. Tak dochádza k plytvaniu energie a uberá z komfortu užívateľom priestoru. MPC regulátor tak dokáže eliminovať tento jav a zabezpečiť kvalitnú reguláciu a je ho možné použiť všade, kde sú zónové regulátory schopné medzi sebou po komunikačnej zbernici vzájomne komunikovať.

Záver

Riadenie vnútorného prostredia budov si vyžaduje analýzu použitých technológií nielen z hľadiska dopadu na kvalitu riadenia, energetickú účinnosť, ale aj na priamy vplyv na človeka. Pri riadení teploty, vlhkosti, rýchlosti prúdenia, tlaku, kvality vzduchu sa objavujú rôzne druhy obmedzení, ktoré musí technológ a projektant rešpektovať, aby zabezpečil tepelnú pohodu ľuďom nachádzajúcim sa v miestnosti s ohľadom na druh činnosti ktorú v nej vykonávajú. Ponúka sa tak zaujímavá problematika riadenia, výsledkom riešenia ktorej má byť optimalizovaná riadiaca štruktúra schopná zabezpečiť želaný stav prostredia. Zónová regulácia v súčasných administratívnych budovách zväčša využíva koncové regulačné prvky na úpravu centrálne distribuovaného upraveného vzduchu s konštantnou teplotou a relatívnou vlhkosťou. Tieto regulačné prvky (aktívne chladiace trámy, fancoily,..) spolu s centrálnym vykurovaním (radiátory, konvektory, fancoily,..) zabezpečujú tepelnú a hygienickú pohodu ľudí. Často však bez toho, aby rešpektovali vzájomné väzby a interakcie jednotlivých častí budovy. Zámer drvivej väčšiny investorov, majiteľov ale aj užívateľov je zvýšenie tepelného komfortu a zníženie energetických nárokov na prevádzku budov. S tým je spojený neustále sa zvyšujúci podiel inštalovaných meračov spotrieb a snímačov, ktorými je monitorovaná aktuálna energetická záťaž budovy. Využitím sieťových rozhraní zónových regulátorov je možné monitorovať aktuálnu teplotu miestností, želanú hodnotu teploty a čiastočne aj poruchy vstupujúce do regulovaného systému (dverný a okenný kontakt, útlm). Zozbierané údaje je možné, ako bolo v práci uvedené, využiť k odstráneniu vzájomných vplyvov susediacich miestností. Vhodným adeptom na zabezpečenie požadovanej kvality regulácie je jednoduchý zónový programovateľný regulátor s PI reguláciou a zbernicovou komunikáciou, ktorému je možné integrovať jednoduchý softvérový blok zabezpečujúci odstránenie väzieb. Takýto regulátor musí mať tiež možnosť vzdialene editovateľnej proporcionálnej a integračnej zložky. Tieto parametre sú u súčasne dostupných regulátorov po zbernici bežne dostupné. Tie sa môžu pomocou genetického algoritmu optimalizovať, podľa jednotlivých separátnych častí budovy.

Výhodnejšou voľbou sa však javí použitie MPC regulátora, ktorého hlavné výhody spočívajú vo včasnom riadiacom zásahu založeného na predikovaní výstupnej veličiny a známeho budúceho želaného stavu. Veľkou výhodou je možnosť integrovať časové programy informujúce regulátor o obsadenosti priestoru, podľa ktorých vie regulátor vybrať predikované výstupy tak, aby bola želaná priestorová teplota v miestnosti dosiahnutá v presne vymedzenom čase. Ďalšou výhodou je, že použitím nezávislých MPC zónových regulátorov je možné integrovať obmedzenia systémových veličín a vzájomne ich medzi okolitými miestnosťami rešpektovať. MPC regulátory sú taktiež schopné eliminovať merateľnú poruchu, ktorej model je však potrebné identifikovať. Ten však závisí hlavne od tepelnoizolačných vlastností obvodového plášťa budovy. Vplyv centrálnej vykurovacej vody je pri MPC regulátoroch možné eliminovať buď zmenou zosilnenia, alebo pridaním modelu poruchy do algoritmu. Základným predpokladom použitia MPC regulátora je však presná identifikácia riadeného systému, identifikácia vplývajúcich porúch, vyšší výpočtový výkon zónového regulátora. Pri návrhu riadenia je nutné brať do úvahy aj možné zmeny v prietoku privádzaného vzduchu (čo ovplyvňuje časovú konštantu systému, ako aj jeho stabilitu). Regulácia takýmto typom regulátora si síce vyžaduje rozsiahlejšie prípravy, ale v konečnom dôsledku sa jeho použitie odrazí na šetrení energie a to hlavne kvôli včasnému zabezpečeniu želaných stavov. Výpočty jednotlivých akčných zásahov sa tiež môžu vykonávať centrálnie na dispečerskom počítači a lokálnym ovládačom vnútri výstupný signál na regulačný člen, ale v súčasnosti je trendom väčšia decentralizácia riadenia, nezávislá na riadiacom uzle.

Motiváciou do ďalšej práce je praktické overenie teoretických úvah a simulačných výsledkov. V súčasnosti je mnoho administratívnych budov obsadzovaných a zazmluvňovaných na základe referencií o kvalite zónovej regulácie a prioritou pre zákazníkov nezriedka býva

tepelný komfort ich zamestnancov. Práve na takéto požiadavky môže reagovať prezentovaná metóda riadenia.

Prínosy dizeračnej práce

Medzi hlavné prínosy dizertačnej práce možno zaradiť:

- Analýza vplyvu susediacich miestností na teplotu riadenej miestnosti
- Návrh kompenzátora vplyvu susediacich miestností
- Návrh optimalizácie parametrov PI zónových regulátorov pomocou genetických algoritmov
- Návrh prediktívneho regulátora akceptujúceho vplyv profilu obsadenosti, poruchy a obmedzení
- Analýza vplyvu centrálnej vykurovacej sústavy a návrh kompenzácie jej vplyvu

Prehľad publikácií autora

Publikácie indexované v databázach SCOPUS , WoS, IEEE:

ADN1

KURILLA, Jozef - HUBINSKÝ, Peter: Model predictive control of room temperature with disturbance compensation. *Journal of Electrical Engineering*, vol. 68, No. 4, 2017

AFD1

KURILLA, Jozef: Temperature control of multidimensional system using decoupled MPC controllers. In FIKAR, M. - KVASNICA, M. *Process control 2017: 21st International conference on process control. Štrbské Pleso, Slovakia. June 6-9, 2017*. 1. vyd. Danvers : IEEE, 2017, s. 351--357. ISBN 978-1-5386-4011-1.

Vedecké práce v domácich nekarentovaných časopisoch:

ADF1

HUBINSKÝ, Peter - KURILLA, Jozef - PALKOVIČ, Lukáš: Estimation of the Gantry Crane Natural Frequency Using MEMS Accelerometer. In: *AT&P Journal Plus*. - ISSN 1336-5010. - Č. 1: Systémy automatického riadenia (2010), s. 89-94

Zoznam použitej literatúry

- [1] SZÉKYOVÁ, M. – FERST, K. – NOVÝ, R. Větrání a klimatizace. Bratislava: Vydavateľstvo Jaga group, 2006. 359 s. ISBN 80-8076-037-3
- [2] ŠTEVO, S. 2013. Inteligentné budovy. Vetranie a klimatizácia: elektronické prednášky. STU Bratislava. - nepublikované
- [3] ŠTEVO, S. 2013. Inteligentné budovy. Človek a pohoda: elektronické prednášky. STU Bratislava.. - nepublikované
- [4] ŠTEVO, S. 2013. Inteligentné budovy. Vykurovacia sústava: elektronické prednášky. STU Bratislava. - nepublikované

- [5] MIKLOVIČOVÁ, E. 2013. Identifikácia systémov. Statické modely: elektronické prednášky. STU Bratislava. - nepublikované
- [6] MIKLOVIČOVÁ, E. 2013. Identifikácia systémov. Pasívny experiment: elektronické prednášky. STU Bratislava. - nepublikované
- [7] SEKAJ, I. 2005. Evolučné výpočty a ich využitie v praxi: Vydavateľstvo Iris, 2005. 157 s. ISBN 80-89018-87-4
- [8] COMACHO, E. F. - BORDONS, C. Model Predictive Control, London: Springer, 2007. 422 s. ISBN 978-1-85233-694-3
- [9] KALOUSEK, M. – HUČKO, B. Prenos tepla. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 1995. 184 s. ISBN 80-227-0881-X
- [10] VESELÝ, V. Riadenie mnohorozmerných, NCP, MPC a hybridných systémov 2010-2013, 125 s. - nepublikované
- [11] KOUDELKOVÁ, D. 2014. Meranie a regulácia v TZB. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2014. 182 s. ISBN 978-80-227-4291-7
- [12] COLEY, D. 1999. Introducing to genetic algorithms for scientists and engineers. London: 1999. 211 s. ISBN 98 1-02-3602-6
- [13] WELTRY, J. – WICKS, Ch.- WILSON, R.- RORRER, G. 2008. Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer. 2008. 711 s. ISBN-13 978-0470128688
- [14] PAWLOWSKI, A. – GUZMÁN, J.L. – NORMEY, R. BERENGUEL, M. 2012. Improving feedforward disturbance compensation capabilities in Generalized Predictive Control, Journal of Process Control, vol. 22, 2012, 527-539 s.
- [15] MOROSAN, P. - BOURAISA, R. - DUMURB, D. - BUISSONA, J. 2010. Building temperature regulation using a distributed model predictive control, American Control Conference, Baltimore, USA, 2010, 3174-3179 s.
- [16] HOLIŠ, R. - BOBÁL, V. 2016. Linear predictive control of nonlinear time-delayed model of liquid-liquid stirred heat exchanger, European Council for Modeling and Simulation, Regensburg, Nemecko, 2016.
- [17] MOROSAN, P. 2011. Distributed predictive control. Approaches to thermal regulation of buildings: dizertačná práca, Supélec, Francúzsko, 2011.
- [18] ŠKULTÉTY J. 2010. Prediktívne riadenie s uvažovaním obmedzení vstupných a výstupných veličín: diplomová práca, STU Bratislava, 2010.
- [19] STEMMAN, M. - RANTZER, A. 2014. Temperature control of two interacting room with decoupled PI control, The 19th World Congress The International Federation of Automatics Control, Cape Town, JAR, 2014, 11722-11727 s.
- [20] NASSIF, N. - KAJL, S. - SABOURIN, R. 2005. Optimization of HVAC control system strategy using two-objective genetic algorithm, HVAC&R Research, vol. 3, 2005, 459–486 s.
- [21] BI, Q. - Cai, W. - WANG, Q. - HANG, C. - LEE, E. - SUN, Y. - LIU, K. - ZHANG, Y. - ZOU, B. 2000. Advanced controller auto-tuning and its application in HVAC systems, Control Engineering Practice, 2000, 633–644 s.

