

Alternativní způsob řízení koncentrace CO₂ pro zdravé obytné prostory

Lubos Hach, Yasuo Katoh

Zařízení zajišťující požadované hodnoty parametrů vnitřního prostředí v budovách zpravidla obsahují i části, které sledují a řídí výměnu vzduchu v uzavřeném prostoru. Matematický model takového prostoru je pak využíván k predikci hodnot sledovaných parametrů vnitřního vzduchu, což vytváří podmínky pro pohodovější a přesnější zásah regulátoru. Nejmenší přípustná rychlost výměny vzduchu v obytných prostorách je dána hygienickými normami a obecně má prioritu před ostatními (menšími) hodnotami při vyhodnocení akčního zásahu na straně regulace. V článku je popsán způsob využití naměřené hodnoty teploty vnitřního vzduchu, která je jeho nejčastěji měřenou stavovou veličinou, k získání odhadu hustoty vzduchu, resp. jeho vlhkosti a potažmo i chemického složení (koncentrace CO₂). Vzájemná vazba mezi množstvím CO₂ a množstvím vodní páry produkovanými člověkem předurčuje za jistých podmínek metodu k využití v běžných obytných prostorách bez dalších (provozních) zdrojů CO₂.

Most common thermal comfort models include in some form air change rate for the sake of thermal evaluation of indoor environment. The lowest rate is set by hygienic standards and primarily should act as prime information for any on-line indoor environment controls. The work demonstrates the way of using mostly measured indoor air temperature for an estimate of air density, i.e. water vapor content, and finally the air chemical content (concentration of CO₂). The relationship between the chemical and water vapor produced by human body predetermines the method as a candidate for control of environment in common occupied spaces without additional (non-human) CO₂ production.

1. Zákonitosti vnímání chemických látek

K zajištění optimálního vnitřního prostředí je zapotřebí zachovávat hodnoty poměrně početné množiny veličin vnitřního prostředí v jistých mezích přijatelných pro pobyt a činnost člověka, který je vnímá prostřednictvím své důmyslné soustavy receptorů. Tyto vlivy působí nezávisle, avšak jejich účinek je často vyjadřován vhodnými parametry (indexy) zahrnujícími v sobě dvě nebo více veličin. V tepelně-vlhkostní oblasti jsou nejznámějšími takovými parametry *předpověď středního tepelného pocitu*, tzv. index PMV (*Predicted Mean Vote*), a *předpověď procenta nespokojených*, tzv. index PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied* – PD, popř. jeho doplněk *Percentage of Satisfied* – PS). Uvedené indexy jsou používány v mnoha doporučeních i technických normativních týkajících se vnitřního prostředí [1] a lze je použít také v simulačních matematických modelech vnitřního prostředí tvořících základ výkonných počítačových programů, které se nyní stále častěji používají při navrhování či zdokonalování reálných interiérů.

Přirozenou součástí tepelně-vlhkostního a pachového prostředí, a tedy i jejich charakteristických parametrů, jsou chemické faktory spjaté s činností lidského organismu, především funkcí plic. Plice zajišťují přímou výměnu vzdušného kyslíku za CO₂ a vodní páru. Intenzita této výměny závisí na stupni fyzické aktivity dané osoby. Přívod dostatečného množství čerstvého vzduchu, takového, aby poměr neboli procentuální zastoupení zejména kyslíku, oxidu uhličitého a vodní páry v interiéru byl udržován v mezích obvyklých pro člověka a jeho dýchání, se zajišťuje větráním. Odchylka od žádoucího „rovnovážného“ podílu jednotlivých složek se záhy projeví v celém řetězci chemických reakcí až do krevního řečiště uvnitř plicních sklípky i vně plic. Tímto transformačním procesem je v konečném důsledku ovlivňován výsledný fyzický a psychický stav jedince. Závislost dobře vystihuje tzv. Weberův-Fechnerův princip, podle kterého je mezi velikostí reakce (vjem příslušného smyslového orgánu) a velikostí vnějšího fyzikálního podnětu (stimulu) vztah

$$\log \Delta I = \log I + \log K_W \quad (1)$$

kde

ΔI je práh citlivosti na podnět,

K_W tzv. Weberův zlomek, jehož velikost nezávisí na velikosti podnětu I .

Jak sdělují logaritmické funkce v (1), reakce lidského těla není přímo úměrná nárůstu stimulu, tj. při znásobení intenzity podnětu se přírůstek vjemu jen přičítá. Z uvedeného tedy např. vyplývá, že v prostředí s menší koncentrací CO₂ bude člověk na určitý nárůst (pokles) koncentrace CO₂ reagovat výrazněji, než by tomu bylo při reakci na stejně velkou absolutní změnu koncentrace CO₂ ve „výměškané“ místnosti, tj. na podstatně vyšší hladině koncentrace CO₂¹⁾.

Lidské tělo úměrně fyzické aktivitě vyměškuje spolu s CO₂ také odpovídající množství vody ve formě vodní páry přímo (dýcháním) i pokožkou po celém těle, a to nejen v závislosti na tepelně-vlhkostních faktorech vnitřního klimatu, a skrz ošacení (v míře zakrytí pokožky oděvem a velikostí tepelného odporu oděvu), ale i podle okamžité psychické aktivity člověka. Odtud plyne, že predikce podle Weberova-Fechnerova vzorce (1) se uplatní i v tomto případě. V tomto smyslu se tak nabízí náhrada sledování koncentrace CO₂ měřením vlhkosti vnitřního vzduchu. Tato proporcionalita se tak spolu s vlhkostí vzduchu, absolutní nebo relativní, promítá i do známé stavové rovnice vlhkého vzduchu, která je výchozí platformou pro spolehlivý výpočet funkce každého klimatizačního zařízení. Vedle stavové rovnice platí pro jakoukoliv změnu obsahu vodní páry v interiéru vzhledem k vlhkosti venkovního vzduchu také Daltonův zákon, podobně jako se jím musí řídit i případně další chemické komponenty (škodliviny) produkované uvnitř vyšetřovaného prostoru.

2. Tepelně-vlhkostní hodnocení stavu vnitřního vzduchu

V obývaném prostoru by měla být především známa nebo některou z ověřených metod odhadnuta celková rychlost výměny vzdu-

¹⁾ Uvedený princip kvantifikace smyslového vnímání lze uplatnit i na další vlivy vyskytující se při hodnocení vlivu tepelně-vlhkostní, pachové a elektroiontové složky prostředí na člověka. Vedle Weberova-Fechnerova zákona (logaritmická závislost) lze stejně dobře použít i mocninný tvar $K(I) = AI^n$ (Stevensův psychofyzikální zákon), kde K je vjem a A a n konstanty charakterizující různé typy podnětů. Při podrobnějším rozboru je vedle nelineárního vztahu mezi podnětem a vjemem třeba brát v úvahu také rychlost změny vnějšího stimulu spolu s neuropsychologickými mechanismy člověka samotného. Tento poměrně nový jev ovlivňuje (zpfesňuje či naopak „rozostřuje“) vstupní informaci z podnětu předávanou příslušným smyslovým orgánem, resp. nervovým zakončením v něm, do centrální nervové soustavy člověka [2].

chu (Air Change Rate – ACH, veličina udávající, kolikrát se během jedné hodiny vymění veškerý vzduch ve vnitřním prostoru), která se porovná s doporučovanou, popř. s mezní (nejmenší) přípustnou hodnotou stanovenou v národní nebo nyní již příslušné evropské normě v závislosti na typu objektu a charakteru a účelu místnosti [3], [4].

Pro většinu obytných prostor se požadovaná hodnota veličiny ACH pohybuje v rozmezí od 1 do 20 h⁻¹. V obytných prostorách s takto vyhovujícím větráním se hodnotí dodržení dalších podmínek. Podmínky použité v dále popsaném konkrétním případě jsou uvedeny v tab. 1. Vyhovující rozsah operativních teplot t_{op} a vlhkostí vnitřního vzduchu pro otopné (zimní) období vymezuje také šrafovaná plocha v psychrometrickém diagramu na obr. 1, kde je podobně vyznačena i situace v letním období.

Hodnoty podle tab. 1 musí být dosahovány v každém místě tzv. obytné zóny uvnitř obytného prostoru (místnosti). V opačném případě se daný prostor hodnotí jako nesplňující požadavky tepelné pohody ve smyslu [3].

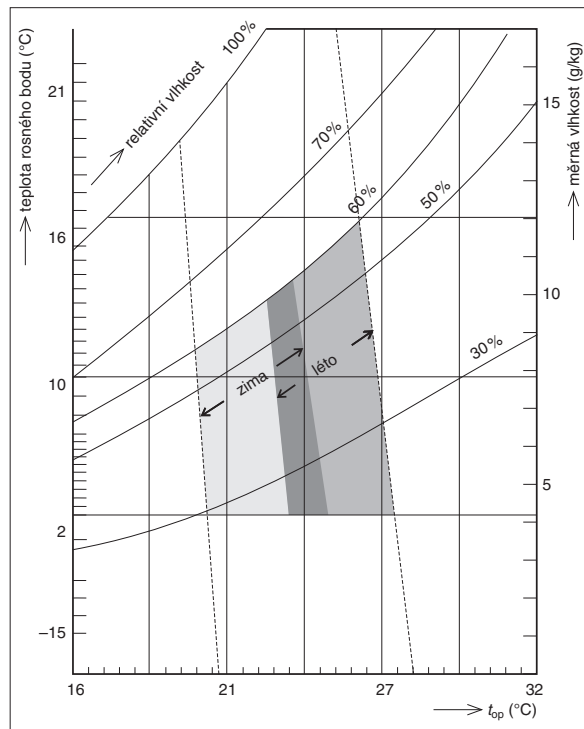
3. Teplotní veličiny užívané v technických normách pro vnitřní prostředí

Ze zákonitostí výměny tepla mezi lidským tělem a okolím je znám účinek výsledné teploty coby průměrné povrchové teploty okolí, tj. obklopujících předmětů a stěn, a teploty vzduchu. Termická fyziologie lidského těla proto závisí na způsobu, jakým je místnost vytápěna. V prostoru námi vyšetřovaném za účelem návrhu a ověření popisované metody byl primárním zdrojem tepla parní konvektor umístěný u vnější (ochlazované) stěny pod oknem, nutně vytvářející v celém vytápěném prostoru nesymetrické a neizotermní teplotní pole. Nicméně vyšetřovaná místnost vykazuje dispozičně symetrii v rovině vertikálního řezu místnosti od venkovní stěny k vnitřní protilehlé stěně. S tímto zjednodušením lze předpokládat, že i teplotní pole uvnitř místnosti bude vykazovat jistý stupeň symetrie k této rovině (hlavní meridián).

Technická norma ASHRAE 55-1992 [3] uvádí pojmy výsledné a operativní teploty (čárkovaně zakreslené křivky v obr. 1 vymezující po obou stranách oblast tepelné pohody v zimním, resp. letním období) jako veličiny, které v sobě kombinují současný účinek teploty vzduchu, radiční teploty okolních ploch, vlhkosti vzduchu a proudění vzduchu bezprostředně nad povrchem pokožky na vnímání

Tab. 1. Vztah mezi tepelně-vlhkostním stavem vzduchu v interiéru a spokojeností přítomných osob v zimním období ([3], [5])

Relativní vlhkost vzduchu H_r (%)	Operativní teplota t_{op} (°C)	Podíl spokojených (Percentage of Satisfied – PS, v procentech)
50	20,5 až 24,5	80
	21,3 až 23,7	90



Obr. 1. Psychrometrický diagram vlhkého vzduchu s vyznačenou oblastí vyhovujících teplot a vlhkosti vnitřního vzduchu v zimním období (vlevo) a částečně se překrývající plochou pro letní období (vpravo)

tepla nebo naopak chladu člověkem. Dalšími faktory při hledání oblastí tepelné pohody (s níž vyjádří souhlas alespoň 80 % přítomných osob) je již zmíněný stupeň fyzické aktivity spolu s tepelným odporem oděvu. Hodnoty obou těchto veličin jsou opět dány normou [3]. Pro zimní období je třeba uvažovat hodnotu fyzické aktivity nejvýše rovnou

1,2 met (1 met = 58,2 W·m⁻²), která odpovídá práci v sedě, a pro odpor oděvu hodnotu asi 1 clo (1 clo = 0,155 m²·K W⁻¹).

Dále platí, že při rozdílu teploty vzduchu t_a a střední radiční teploty (Mean Radiant Temperature) z okolních sálajících ploch t_{MRT} menším než 4 K lze jednoduše určit t_{op} jako prostý aritmetický průměr hodnot t_a a t_{MRT} . Při rychlosti proudění vzduchu větší než 0,2 m·s⁻¹ (která se ale v obytných místnostech zřídka kdy vyskytuje) je takto stanovená hodnota t_{op} poněkud vychýlena směrem k radiční teplotě. Pro danou (změřenou) vlhkost vzduchu lze pak snadno určit správnou hodnotu t_{op} z rovnice tepelné rovnováhy tělesa (v praxi černě natřené koule o průměru asi 15 cm umístěné ve středu vyšetřovaného prostoru ve výši 1,1 m nad podlahou) podle vztahu

$$t_{op}(\tau) = \frac{h_{cv}(\tau)t_a(\tau) + h_r(\tau)t_{MRT}(\tau)}{h_{cv}(\tau) + h_r(\tau)} \quad (2)$$

kde

h_{cv} je součinitel přestupu tepla konvekcí (W·m⁻²·K⁻¹),

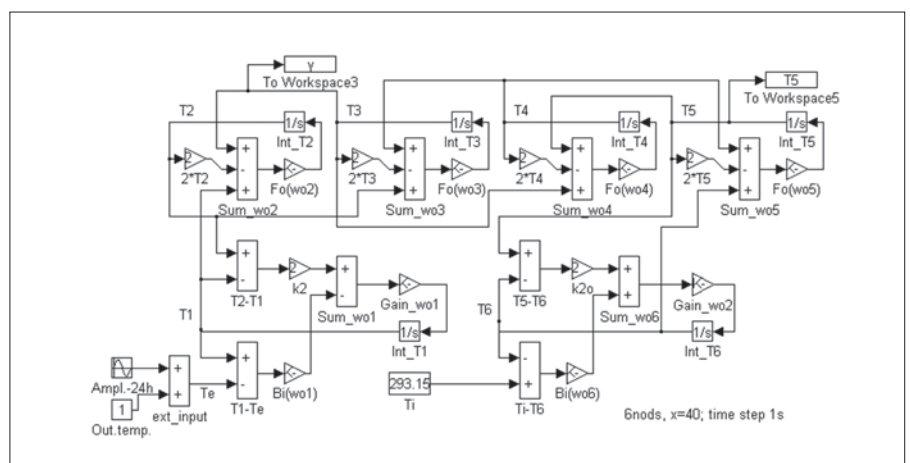
h_r součinitel přestupu tepla radiací (W·m⁻²·K⁻¹),

t_a teplota vzduchu (°C),

t_{MRT} střední radiční teplota (°C),

τ čas (s).

K výpočtu průměrných povrchových teplot obklopujících stěn v místnosti v závislosti na vnějších klimatických podmínkách (ochlazovaná venkovní stěna) a sousedících prostorech (teplota podlahy, stropu a tří vnitřních stěn) byly použity empirické vztahy pro přenos tepla mezi vzduchem a svislými a vodorovnými plochami při hodnotách tepelné vodivosti podle materiálu stěny (vesměs send-



Obr. 2. Model jednorozměrného vedení tepla vnější (ochlazovanou) stěnou s nestejnými povrchovými teplotami na vnější a vnitřní straně v programovém prostředí Matlab/Simulink

vičová konstrukce omítka-cihla-omítka). Pro silnější stěny podlahy, stropu a venkovní zdi, u nichž vyšlo Biotovo číslo $Bi > 0,1$, bylo zvlášť třeba zjistit povrchové teploty střednědobým měřením, tj. po dobu, kdy se stěna nacházela v kvazistacionárním tepelném stavu. Tento stav určuje i počáteční teplotní podmínky jednorozměrného vedení tepla stěnou popsaného Laplaceovou rovnicí s použitím modelu v programovém prostředí Matlab/Simulink podle obr. 2.

4. Teplotní a rychlostní profily proudění vnitřního vzduchu a návrh rovinného (2D) modelu

V dané místnosti byla šetřena teplotní pole (střednědobé měření) a odhad obrazu proudění vzduchu (modelem). Metodika mapování obou polí, teplotního i proudového, je poměrně dobře popsána v literatuře (např. [6], [7]). Povrchové teploty všech stěn byly měřeny dotykovými teploměry. Teplota vzduchu (suchý teploměr) byla měřena na různých místech vně i uvnitř obytné zóny ve výškách 10, 110 a 170 cm nad podlahou podle [4]. Střední radiální teplota byla zjišťována kulovým teploměrem (Vernon) umístěným ve středu místnosti. Matematický model obrazu proudění vzduchu představuje diskretizaci Navierovy-Stokesovy rovnice (NSE) [6] v hlavním meridiánu, tj. rovinné řešení proudového pole

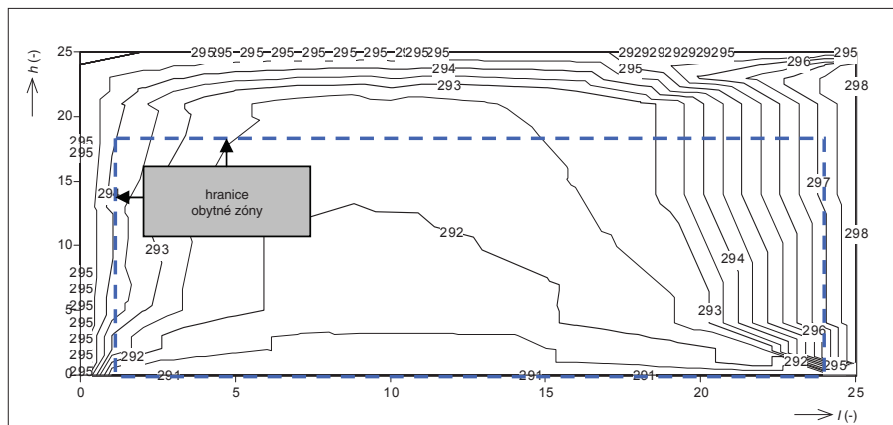
$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (3a)$$

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + Pr \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + Ra_i \cdot Pr \cdot T \quad (3b)$$

$$u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial^2 T}{\partial x_j \partial x_j} \quad (3c)$$

kde u jsou složky rychlostí ve vswislém a vodorovném směru, $j = 1, 2$, ($m \cdot s^{-1}$), x prostorové souřadnice ve vswislém a vodorovném směru, $j = 1, 2$, (m), p_v parciální tlak vzduchu (Pa), T termodynamická teplota vzduchu (K), Pr , Ra Prandtlovo a Rayleighovo číslo (-).

K řešení NSE numerickou iterační metodou byl použit algoritmus s dopředným časovým krokem [7] a s diferencí druhého řádu časového i prostorového kroku. Uvnitř prostorového čtvercového kříže s diferencemi Δx a Δy (výpočetní mřížka $\Delta x \times \Delta y$), byly stavové veličiny považovány za konstantní [8]. Dvourozměrná výpočetní síť v rovině hlavního meridiánu místnosti tak představuje pravoúhlý rovnoběžník s hranicemi na vnitřním povrchu obklopujících stěn s danými okrajovými podmínkami (nulová rychlost vzduchu ve vrstvě bezprostředně přiléhající ke stěně). Prostorový kříž byl zvolen natolik jemný, aby byla zaručena numerická stabilita výpočtu. Tlak vzduchu byl počítán současně ze stavové rovnice gradientní metodou a vzduch

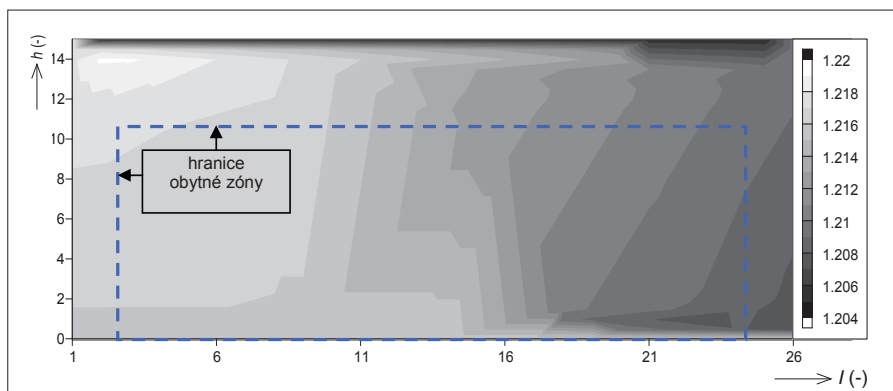


Obr. 3. Zobrazení vypočítaných izoterm v místnosti (hlavní meridián) s asymetricky ochlazenou venkovní stěnou (vpravo) při rychlosti výměny vzduchu $1 h^{-1}$; maximální rozdíl teplot ve vertikálním směru uvnitř obytné zóny je 2 K (použitá výpočetní mřížka 25×25 bodů)

byl považován za ideální plyn s Poissonovou konstantou asi 1,4. K ustálení obrazu proudění, a tedy dosažení kvazistacionárního stavu primární cirkulace vzduchu v místnosti přispívala přirozená infiltrace, neboť ventilační systém byl vypnut. Výsledek numerického výpočtu naprogramovaného v jazyce Digital Fortran byl zobrazen v grafickém programu Stanford Graphic, který umí zobrazit data ve dvourozměrných vektorových polích pro rychlost vzduchu i izoterm teplotního pole

výstup z programu Stanford Graphic doplněný o vyznačení pobytové zóny je na obr. 4.

Mapa rozložení hustoty vnitřního vzduchu v místnosti představuje vlastně on-line monitoring maximálních odchylek relativní vlhkosti vzduchu ΔH_r od výchozího ustáleného stavu, jež se mohou vyskytnout uvnitř obytné zóny vymezené na obr. 3 a obr. 4 modrou přerušovanou čarou (doporučené hranice pobytové zóny opět udává norma ISO, popř. [9]). Tato mapa do jisté míry substituuje pří-



Obr. 4. Zobrazení dvourozměrného profilu hustoty vzduchu v hlavním meridiánu vyšetřovaného prostoru; kolísání jejich hodnot uvnitř obytné zóny nepřesahuje 1,1% (asi $0,013 kg \cdot m^{-3}$, viz měřítko vpravo), rychlost výměny vzduchu $1 h^{-1}$ (použitá výpočetní mřížka 26×15 bodů)

v řezu místností (obr. 3) a jednobarevným stínováním odlišit hodnoty dalších stavových veličin (obr. 4).

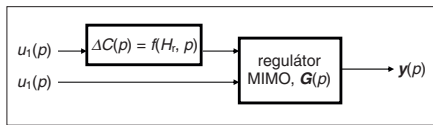
5. Bilance CO₂ ve vnitřním vzduchu a možnosti jeho regulace

Teplotní pole místnosti spolu s dvourozměrným rychlostním profilem představuje hlavní výstup řešení rovnic 3a, 3b a 3c. Rozložení parciálního tlaku vzduchu, a tedy jeho vlhkosti, je doplňujícím výstupem výpočtu, neboť jde o veličiny vázáné spolu s již zmíněnou stavovou rovnicí vlhkého vzduchu ($p/\rho T = \text{konst.}$, kde ρ je hustota vzduchu). Odpovídající mapa rozložení jemných rozdílů hustoty vzduchu s jednobarevným odstíněním jako

mé měření vlhkosti, které by si vyžadovalo poněkud nepraktické a esteticky nevhodné umístění příslušných čidel na hranici i uvnitř obytné zóny, *de facto* v krajním případě v těsné blízkosti pobývajících osob. Výstupní údaje o vlhkosti z matematického modelu je možné využít i jako odhad v blízkém okolí hlavního meridiánu místnosti a lze je po vhodném zpracování použít jako vstupní veličiny regulátoru řídicího klima v místnosti.

Prostorovou matici rozložení lokálních hodnot relativní nebo absolutní vlhkosti lze využít k odhadu celkové produkce vodních par a průměrné koncentrace vlhkosti v daném prostoru, ale již ne ke konstrukci mapy koncentrací CO₂, což je dáno prouděním a promícháváním vrstev vzduchu na makroskopické úrovni. Tež vli-

vem rozdílné atomové, popř. molekulové hmotnosti jednotlivých plynů a par obsažených ve vzduchu by se za určitého zjednodušení (bez uvažování vlivu teploty) působením gravitace a za ideálního stavu zcela klidného vzduchu rozvrstvíly postupně shora dolů vodní pára (voda, značka H_2O , molekulová hmotnost 18), dusík (N_2 , 28) a kyslík (O_2 , 32). Usuzovat pro-



Obr. 5. Blokové schéma regulace kvality vnitřního vzduchu s regulátorem typu MIMO s přednostním vstupem signálu koncentrace CO_2 (p – obrazová proměnná)

to o možné distribuci CO_2 jen na základě informací o přítomné vlhkosti není možné.

Mapa lokálního rozložení hustoty se během monitorování aktualizuje při každém přepočítání hodnot matice relativní vlhkosti vzduchu. Tento přepočet proběhne bezprostředně po sejmutí údajů snímačů teploty a vlhkosti a také je-li rozdíl od předchozí hodnoty hustoty v daném místě uložené v téže matici v prostředí Matlab větší než jeho předem zvolená minimální hodnota. Závislost mezi množstvím vodní páry a množstvím CO_2 produkovanými člověkem je v malém rozsahu fyzikálních aktivit člověka a stálého tepelného odporu oděvu lineární. Při větších rozsazích se mění v nelineární závislost, kterou lze dobře aproximovat mocninou funkcí či v odchylkovém tvaru s použitím mnohočlenu

$$\Delta C(\tau) = \sum_{n=0}^m a_n [\Delta H(\tau)]^n \quad (4)$$

kde

ΔC je odchylka okamžité koncentrace oxidu uhličitého C od její vztažné hodnoty C_0 v čase $\tau = 0$, tj. $\Delta C = C - C_0$ (ppm),

ΔH_τ odchylka okamžité relativní vlhkosti vzduchu H_τ od její vztažné hodnoty v čase $\tau = 0$ (%),

a_n koeficient, který je v malém rozsahu změny vlhkosti vzduchu konstantní (ppm·%⁻ⁿ).

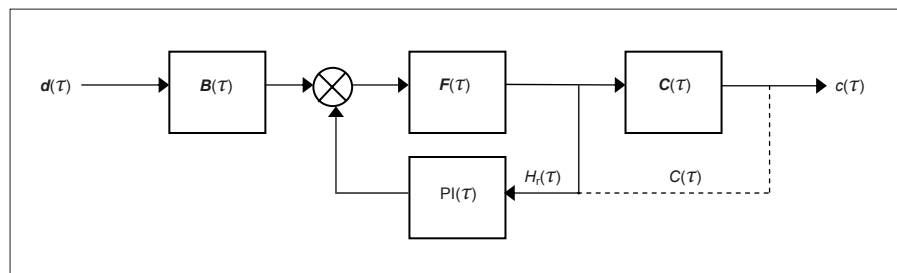
Hodnoty koncentrací CO_2 jsou opět ukládány do vektoru a průběžně aktualizovány v programu Matlab v tomtéž časovém kroku, v němž se s použitím stavové rovnice počítá relativní vlhkost. Ke stanovení hodnoty koeficientu a_n , $n = 0, 1, \dots, m$ v rovnici (4) je třeba jednorázově provést „kalibraci“ s přístroji dostatečné přesnosti, u měřidel koncentrace CO_2 nejlépe s čidly pracujícími na principu útluhu infračerveného záření.

Jestliže hodnota koncentrace CO_2 načtená do vektoru příštím výpočtem dosáhne největší povolené hodnoty nebo ji překročí, má signál $u_1(p)$ koncentrace CO_2 na vstupu do regulátoru typu MIMO řídicího vnitřní klima z hygienického hlediska přednost před vstupními signály $u_i(p)$ reprezentujícími teplotu, popř. vlhkost vzduchu v interiéru. Schematicky je

toto ukázáno na obr. 5 a při známé přenosové matici $G(p)$ regulátoru (dané použitým regulátorem, nejčastěji P nebo PI, popř. PS regulátor) vyplývá velikost výstupního signálu $y(p)$ v obrazové oblasti

$$y(p) = G(p)u(p) \quad (5)$$

Při ventilaci řízené podle teploty, popř. vlhkosti s prioritním sledováním koncentrace CO_2 podle obr. 5 vzroste akčním zásahem regulátoru množstvím přiváděného vnějšího vzduchu s nižší koncentrací CO_2 , kterým se uvnitř místnosti zředí koncentrace nejen CO_2 , ale i dalších kontaminantů a pachů uvolňovaných ze stavební konstrukce, zařízení místnosti i člověka samotného pod stanovený práh. Opačně, při



Obr. 6. Model regulačního obvodu koncentrace CO_2 /relativní vlhkosti v místnosti s PI regulátorem a sledováním on-line řízených veličin (blok C)

poklesu koncentrace CO_2 , se přiváděné množství čerstvého vzduchu vrací zpět na původní hodnotu. Pokles koncentrace CO_2 pod akceptovatelnou mez (danou podle druhu místnosti a způsobu jejího využití) 1 000 ppm znamená splnění kritéria pro posuzování oděrové složky prostředí, kterou je právě úroveň koncentrace oxidu uhličitého a která je akceptovatelná většinou osob.

6. Dynamická matice koncentrací CO_2 v prostředí Matlab

Časová aktualizace matice koncentrací CO_2 v programu Matlab je výhodná také proto, že reakce a do jisté míry i adaptace lidského těla vystaveného zátěži CO_2 jsou časově závislé. Všeobecně přijímaný dokument [11] stanovuje bezpečnou koncentraci CO_2 v ovzduší 10 000 ppm při osmi hodinách a 30 000 ppm při patnácti minutách pobytu na pracovišti. Průměrná koncentrace CO_2 během osmi hodin nemá tedy překročit hranici 10 000 ppm a obdobně průměrná koncentrace ve čtvrt hodině nemá překročit 30 000 ppm. Uvedené meze byly určeny experimentálně pro zdravého dospělého člověka a nemusí být vhodné pro děti a starší osoby.

Zmíněné normativy lze s výhodou použít k optimalizaci řízení výměny vzduchu a omezení četnosti spouštění ventilátoru zajišťujícího větrání sledovaného prostoru. K tomu je nutná znalost koncentrace CO_2 a trendu (rychlosti a směru) její změny v čase. V daném případě se tato znalost získá s použitím záznamu maximálních hodnot relativní vlh-

kosti (parciálního tlaku vodní páry ve vzduchu, a tedy maximálních hodnot koncentrace CO_2) zjištěných v síti 8×15 bodů v hlavním meridiánovém řezu místnosti v časových krocích bezprostředně předcházejících okamžiku určení aktuální maximální hodnoty. V příslušných maticích jsou pak vždy spolu s aktuálními hodnotami relativní vlhkosti a koncentrace CO_2 uloženy jejich hodnoty z předcházejících dvou časových vzorků, a to pro dva body sousedící v rovině hlavního meridiánu místnosti ve svislém směru.

Je-li trend nárůstu koncentrace CO_2 zjištěný z uvedených tří vzorků (sklon tečny k jejich spojnici) malý, nespouští regulátor ventilaci místnosti hned při překročení nastavené mezní hodnoty koncentrace CO_2 , ale až při

překročení této hranice o předem nastavenou hodnotu, např. 5 % z maximálního rozsahu 10 000 ppm (10 % pro 30 000 ppm).

Uvedené matice, tj. matice hodnot relativní vlhkosti a matice koncentrací CO_2 , jsou v modelu na obr. 6 reprezentovány maticemi v systému Matlab po řadě označenými $F(\tau)$ a $C(\tau)$. Dále v obr. 6 značí vektor $d(\tau)$ poruchovou veličinu, $B(\tau)$ matici vstupu a $PI(\tau)$ proporcionálně-integrační regulátor řídicí množstvím čerstvého vzduchu přiváděného do místnosti. Blok $C(\tau)$ obsahuje rovnici (4). Model uzavřeného regulačního obvodu podle obr. 6 byl realizován v programovém prostředí Matlab/Simulink [10].

7. Závěr

Pro danou místnost, klasifikovanou podle EN 14449 jako obytný prostor v tzv. budově s malým znečištěním (*low-polluting buildings*), s rozměry:

- místnosti 7 250 × 4 550 × 3 000 mm (délka × šířka × výška),
 - modelu (1:6) 1 200 × 760 × 500 mm,
 - obytné zóny 6 050 × 3 350 × 1 900 mm,
- obsazenou jednou dospělou osobou s fyzickou aktivitou menší než 1,2 met (práce vsedě) byla sestavena dvourozměrná mapa stavových veličin vlhkého vzduchu v rovině hlavního meridiánu místnosti. Ze stavové rovnice pro vlhký vzduch byla vypočítána relativní a absolutní vlhkost vnitřního vzduchu a její maximální hodnoty. Z funkční závislosti mezi produkcí vodní páry a množstvím CO_2 produkovaného člověkem při dané fyzické aktivitě byla naplněna matice hodnot koncentrací CO_2 . Tato

matice byla v programovém prostředí Matlab použita k modelování zásahu PI regulátoru ovládajícího množství čerstvého vzduchu (koncentrace 450 ppm CO₂) přiváděného do místnosti. Po dobu regulace odpovídající osmihodinové pracovní době byla průměrná hodnota koncentrace CO₂ dostatečně vzdálena od přípustné hladiny 10 000 ppm podle [12]. Akční zásah PI regulátoru následující tepelně-vlhkostní požadavek byl pro snížení koncentrace CO₂ přívodem vzduchu s koncentrací 450 ppm CO₂ dostačující. Odhad koncentrace a její závislosti na relativní vlhkosti platí za předpokladu absence jakýchkoliv technologických zdrojů CO₂ v daném prostoru.

Literatura:

- [1] ISO EN 7730: *Moderate thermal environments – determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort*. ISO, 1994.
- [2] MATELL, M. S. – MECK, W. H.: *Neuropsychological mechanisms of interval timing behavior*. BioEssays, 2000, 22, 94–103, John Wiley & Sons, Inc.
- [3] ASHRAE Standard 55-1992: *Thermal environment conditions for human occupancy*.
- [4] ISO 7726: *Ergonomics of the thermal environment – instruments for measuring physical quantities*. ISO, 1998.
- [5] HUMPHREYS, M. A.: *Outdoor temperatures and comfort indoors*. Building Research and Practice, 1978, Vol. 6, No. 2.
- [6] TIAN, Y. S. – KARAYIANNIS, T. G.: *Low turbulence natural convection in an air filled square cavity, Part I: The thermal and fluid flow fields*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, Vol. 43 (6), pp. 849–866.
- [7] WEATHERS, J. W.: *A Study Of Computational Fluid Dynamics Applied To Room Air Flow*. Oklahoma Christian University of Science and Arts, 1990.
- [8] WILLIAMS, P. T. – BAKER, A. J. – KELSO, R. M.: *Numerical calculation of room air motion – part 2: The continuity constraint finite element method for three-dimensional incompressible thermal flows*. ASHRAE Transactions, 1994, Vol. 100, Part 1, pp. 531–548.
- [9] TOFTUM, J. – JORGENSEN, A. S. – FANGER, P. O.: *Upper limits of air humidity for preventing warm respiratory discomfort*. Energy and Buildings, 1998, Vol. 28, pp.15–23.
- [10] HACH, L. – KATOH, Y. – JANICEK, P.: *PS-matrices as Complementary Input for Thermal Comfort Controllers*. In: Proceedings of Technical Computing Prague, 2008, ISBN 978-80-7080-692-0.
- [11] ASHRAE Standard 62-1989: *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*.
- [12] ASTM Standard D-6245–98: *Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation*.

Dr. Eng. Lubos Hach, Ph.D.,
ústav aplikované fyziky a matematiky,
Fakulta chemicko-technologická,
Univerzita Pardubice
(lubos.hach@upce.cz),
Dr. Eng. Yasuo Katoh,
Department of Mechanical Engineering,
Faculty of Engineering,
Yamaguchi University,
Ube, Japonsko

Článek vychází z příspěvku autorů s názvem *CO₂ control alternative for healthy residential spaces* uvedených na konferenci *Technical Computing Prague – TCP 2009*, Praha, listopad 2009.

Evropskou cenu roku za energeticky úsporný projekt získal český Siemens

Prestižní Evropskou cenu pro energetické služby v kategorii *Nejlepší projekt energetických služeb v komerčním sektoru* za rok 2009 získal tým českých inženýrů za energeticky úsporné řešení využitě v závodě na výrobu elektromotorů společnosti Siemens v Mohelnici. Díky úspěšnému projektu závod ušpil více než 50 % roční spotřeby energie na vytápění, ohřev teplé vody a výrobu technologické páry. Současně pomohl významně snížit emise CO₂.

Evropskou cenou pro energetické služby jsou každoročně oceňovány mimořádné počiny při rozvoji energetických služeb v Evropě. Zástupci společnosti Siemens ocenění převzali 13. září 2010 v Bruselu v rámci Evropského dne energetických služeb, kterého se zúčastnila také Connie Hedegaardová, eurokomisařka pro ochranu klimatu. Porota složená z mezinárodních expertů ocenila mohelnický projekt především pro vyšší dosažených úspor energie, pozitivní dopad na životní prostředí a vliv na rozvoj energetické efektivity v soukromém sektoru.

V rámci oceněného projektu byla v mohelnickém výrobním závodě optimalizová-

na výroba a distribuce tepla. Zakázka v hodnotě 44,5 milionu korun smluvně garantuje úsporu minimálně 31 % z původních celkových ročních nákladů na teplo, což představuje 14,1 milionu korun. Doba návratnosti celé investice činí pouhé tři roky.

Pro technologické účely byly instalovány tři vyvíječe páry. Výrobní haly jsou nyní



Obr. 1. Předávání ceny za Nejlepší projekt energetických služeb v komerčním sektoru (zleva: Radim Kohoutek, ředitel útvaru energetických služeb společnosti Siemens, eurokomisařka pro ochranu klimatu, paní Connie Hedegaardová a Gunnar Liehr, reprezentant Evropského sdružení poskytovatelů energetických služeb)

vytápěny teplovzdušnými plynovými jednotkami, teplá voda se připravuje lokálně v plynových zdrojích přesně podle potřeby. Všechna nově instalovaná zařízení jsou řízena systémem Siemens Desigo PX s dispečerským pracovištěm vybaveným vizualizačním rozhraním, díky němuž mohou zodpovědní pracovníci na monitoru sledovat aktuální stav i průběhy teplot v čase, spotřebu energií a vody, informace o provozu či alarmní hlášení v libovolné z více než padesáti budov v areálu závodu. Přehled o spotřebách energií zajišťuje monitorovací systém EMC (*Energy Monitoring a Controlling*).

Siemens byl v posledních několika letech za energeticky úsporné projekty oceněn již několikrát. V roce 2006 získal cenu za Nejlepší energeticky úsporný projekt pro budovy v majetku města Berlín a toto ocenění obhájil i o rok později energeticky úsporným projektem krytého bazénu Brigittenau ve Vídni. V rámci České republiky obdržel v roce 2006 ocenění Energetický projekt roku za úspěšnou revitalizaci areálu psychiatrické léčebny Kosmonosy.

(Siemens, s. r. o.)