

Ing. Tomáš BÄUMELT¹⁾
Ing. Jiří DOSTÁL^{1), 2)}

¹⁾ ČVUT v Praze, Univerzitní
centrum energeticky efektivních
budov

²⁾ ČVUT v Praze, Fakulta
elektrotechnická, Katedra řídicí
techniky

Recenzent
Ing. Jan Šíroky, Ph.D.

Distribuovaná identifikace modelu budovy pro účely pokročilé regulace

Distributed Building Model Identification for Advanced Control Purposes

Článek se věnuje identifikaci termodynamických modelů budov, sloužících následně potřebám řídicích algoritmů. Popisuje problematiku jejich modelování a přístupy identifikace jejich parametrů. Je představen přístup k identifikaci modelu využívající dekompozice celkového problému na dílčí menší lokální podproblémy, který přináší lepší škálovatelnost s velikostí modelu. Lokální modely jsou nalezeny s využitím grey-box identifikace a koordinací sdílených parametrů je dosaženo globální konzistence. Na datech z pokročilého simulátoru budov je následně testována funkcionální tato metody.

Klíčová slova: identifikace modelu budov, dekompozice, grey-box modelování

The article addresses the identification of thermodynamic models of buildings, serving the needs of control algorithms. It describes the issue of their modelling and approaches to identification of their parameters. It presents an approach to identification of a model with use of decomposition of the overall problem to partial, smaller, local sub-problems, which brings better scalability with the size of the model. Local models are found using grey-box identification and global consistency is achieved by coordination of shared parameters. The functionality of the method is consequently tested on data from an advanced building simulator.

Keywords: building model identification, decomposition, grey-box modelling

ÚVOD

Vytápění, či obecněji systémy zajišťující optimální vnitřní prostředí v budovách (HVAC), tvoří již nedílnou součást moderních budov. Nasazením pokročilé regulace (MaR) těchto systémů lze ušetřit významnou část provozních nákladů (17 až 24 %, [1]).

Naproti tomu je stále velmi používána klasická jednoduchá regulace s jedním prostorovým termostatem, která neumožňuje udržovat rozdílné tepelné podmínky v různých místnostech. Navíc se často jedná o tzv. on/off regulaci, která přináší cyklování kolem požadované teploty vzduchu v místnosti, což zbytečně zatěžuje akční členy soustavy a dochází k jejich rychlejšímu opotřebení.

Většina pokročilých algoritmů, např. prediktivní regulace teploty, naopak umožňuje multizónovou regulaci a minimalizuje energetické náklady. Nutnou podmínkou je ovšem kvalitní matematický model budovy (MPC – Model Predictive Control). Jelikož se jedná o model sloužící primárně potřebám řízení, není nutné, aby vystihoval naprosto přesně všechny aspekty tepelného chování budovy. Naopak je žádoucí, aby se jednalo o co nejjednodušší model dobře aproximující hlavní rysy tepelného chování dané budovy [1].

Existuje několik přístupů, jak tento model získat – jedním z nich je získání struktury modelu využitím fyzikálních zákonů [2] s následným určením hodnot parametrů statistickými metodami [3]. To lze navíc provádět distribuovaným způsobem [4], [5], [6] tak, že dochází paralelně v čase k identifikaci modelů zón na lokální úrovni a následně vzájemné koordinaci.

Termodynamické modelování budov

Chceme-li získat kvalitní termodynamický model budovy, musí tento model zahrnovat informaci o všech významných jevech, které ovlivňují termodynamické chování budovy. Pro názornost budeme dále uvažovat pouze jedno podlaží budovy, nikoli budovu celou. Tedy budeme brát v úvahu jen horizontální přestupy tepla mezi jednotlivými místnostmi a okolním (venkovním) prostředím. Jelikož model budovy je popsán hlavně prostřednictvím tepelných kapacit a odporů, využívá se pro jeho modelování technika tzv. tepelných RC obvodů.

Základní rovnici, kterou lze získat úpravou Fourierova zákona, je rovnice vedení tepla [7]:

$$q = -\frac{\Delta T}{R} = -(UA)\Delta T \quad [\text{W}] \quad (1)$$

kde je:

- q skalární tepelný tok,
- ΔT tepelný rozdíl mezi dvěma místy v prostoru [K],
- R tepelný odpor mezi těmito dvěma místy [K/W],
- U měrná tepelná vodivost [W/(m²K)],
- A teplosměnná plocha [m²].

Celková tepelná vodivost teplosměnnou plochou je v tomto článku označena dvoupísmenným označením UA [W/K]. Označení např. UA_{w1} označuje celkovou tepelnou vodivost prvku „ w_1 “.

Dalším parametrem, který charakterizuje tepelné chování objektů, je tepelná kapacita:

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad [\text{J/K}] \quad (2)$$

kde je:

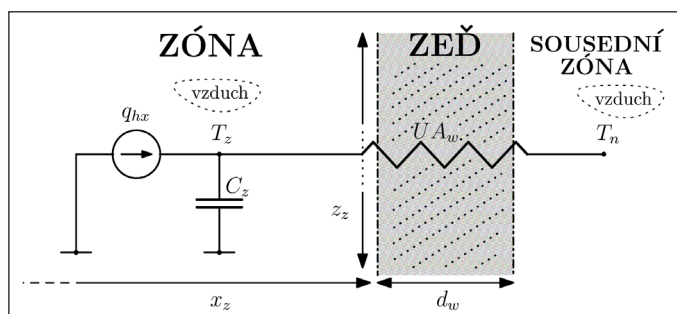
- Q teplo přijaté objektem [J],
- ΔT příslušný teplotní rozdíl [K].

Derivováním rovnice (2) podle času získáme známou obyčejnou diferenciální rovnici 1. řádu, která popisuje teplotní vývoj tělesa:

$$\dot{T} = \frac{q}{C} \quad [\text{K/s}] \quad (3)$$

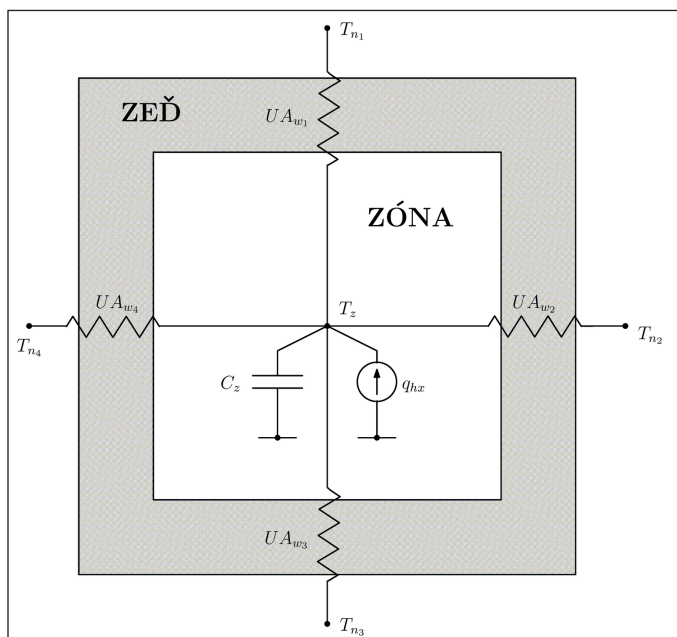
Zjednodušený model zóny

Jako zónu označujeme základní jednotku budovy, ve které je měřena teplota a tepelný tok z výměníku do dané zóny. V našem případě je tím myšlena jedna místnost opatřená danou instrumentací. Model zóny je



Obr. 1 Náhradní termodynamický obvod místnosti a zdi

Fig. 1 Substitute thermodynamic circuit of the room and wall



Obr. 2 Náhradní termodynamický obvod zóny

Fig. 2 Substitute thermodynamic circuit of the zone

zjednodušen tím, že nejsou brány v úvahu tepelné kapacity zdí, jsou pouze tepelným odporem, a tato kapacita je modelována zvýšenou kapacitou místnosti. Náhradní termodynamický obvod místnosti a zdi je znázorněn na obr. 1. Na obr. 2 je uveden příklad pro zónu ohraničenou čtyřmi zdi.

S využitím náhradního termodynamického obvodu můžeme odvodit stavový popis zóny:

$$\dot{T}(t) = A_z T(t) + B_z u(t) \quad (4)$$

kde jsou stavové matice dány jako:

$$A_z = -\frac{1}{C_z} \sum_{i=1}^4 UA_{w_i}, \quad B_z = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_z} & \frac{UA_{w_1}}{C_z} & \dots & \frac{UA_{w_4}}{C_z} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Stavový vektor je $T(t) \in \mathbb{R}$ je roven teplotě v zóně:

$$T(t) = T_z(t) \quad (6)$$

a vektor vstupů $u(t) \in \mathbb{R}^{5 \times 1}$ je v tomto konkrétním případě:

$$u(t) = \begin{bmatrix} q_{hx} \\ T_{n_1} \\ \vdots \\ T_{n_4} \end{bmatrix} (t) \quad (7)$$

kde $T_{n_1}, \dots, T_{n_4}$ jsou teploty sousedících zón (teploty prostorů za zdi dané zóny).

Celý model budovy je pak tvořen propojením těchto lokálních modelů zón.

Grey-box modelování

V předchozí části jsme odvodili užitím fyzikálních zákonů termodynamický model zóny. Ovšem číselné hodnoty jeho parametrů (C_z , UA_w) jsou neznámé. Jedná se tedy o tzv. grey-box model – model se strukturou odvozenou z fyzikálních zákonů (white-box) s neznámou hodnotou parametrů.

Model (4) můžeme přepsat jako parametrizovaný časově spojitý LTI (Linear Time Invariant) stavový model:

$$\dot{x}(t) = A_c(\theta)x(t) + B_c(\theta)u(t) \quad (8)$$

$$y(t) = C_c x(t)$$

Matice $C_c = 1$, $A_c(\theta)$ a $B_c(\theta)$ odpovídají strukturou maticím A_z a B_z v (5), nyní jsou již však parametrizovány vektorem θ , který v sobě agreguje všechny neznámé parametry grey-box modelu. Parametr θ je tedy v obecném případě dán jako:

$$\theta = \begin{bmatrix} C_z & UA_{w_1} & \dots & UA_{w_n} \end{bmatrix}^T, \quad \theta \in \mathbb{R}^{n_p \times 1}, \quad \theta_i > 0, \quad i = 1, \dots, n_p \quad (9)$$

kde index n je roven počtu stěn topologicky obklopujících danou zónu a $n_p = n + 1$ značí dimenzi vektoru θ .

Jelikož měřená data jsou zpravidla měřena s diskretním časovým krokem T_s , je nutné časově spojitý model (8) diskretizovat (postup v [8], [9]) do tvaru:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= A(\theta)x_k + B(\theta)u_k \\ y_k(\theta) &= Cx_k \end{aligned} \quad (10)$$

Odhad parametrů

Odhad parametrů provedeme metodou nejmenších čtverců (LSE), kde hledáme takové parametry θ , aby součet všech kvadrátů odchylek byl co nejmenší:

$$\theta^* = \underset{\theta}{\operatorname{argmin}} V(\theta) = \frac{1}{2} E(\theta)^T E(\theta) \quad (11)$$

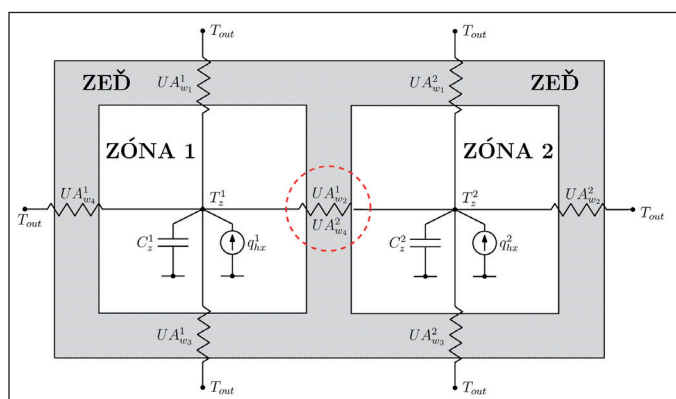
kde $E(\theta) \in \mathbb{R}^{K \times 1}$ je vektor odchylek:

$$E(\theta) = Z - Y(\theta) = \begin{bmatrix} z_0 & \dots & z_{K-1} \end{bmatrix}^T - \begin{bmatrix} y_0(\theta) & \dots & y_{K-1}(\theta) \end{bmatrix}^T \quad (12)$$

Je tvořen měřeným výstupem Z o velikosti K vzorků a jeho predikcí $Y(\theta)$. Predikce je vypočítána s využitím časově diskretního grey-box modelu (10) pro daný vektor parametrů θ .

Distribučovaná identifikace

V předchozích částech jsme odvodili a formulovali grey-box identifikaci,



Obr. 3 Dvouzónový R1C0 model s červeně označenou komplikující proměnnou
Fig. 3 Two-zone R1C0 model with complicating variable marked red

kterou použijeme k identifikaci lokálního modelu zón. Dále je ovšem třeba zajistit rovnost sdílených parametrů. Vše ukážeme na příkladu dvouzónové budovy, jejíž schéma je vyznačeno na obr. 3.

Optimalizační problém identifikace takové budovy lze popsat jako:

$$\min_{\theta_1, \theta_2} V(\theta_1, \theta_2) = V_1(\theta_1) + V_2(\theta_2), \quad (13)$$

za podm. $\theta_{i,j} > 0, \quad i = 1, 2, \quad j = 1, \dots, n_{p_i}$

kde $V(\cdot)$ je kritériální funkce a θ_i vektor parametrů definovaný v (11), resp. (9). Tento optimalizační problém nelze jednoduše separovat na dva samostatné problémy, neboť v optimalizačních proměnných

$$\theta_1 = \begin{bmatrix} C_z^1 & UA_{w_1}^1 & UA_{w_2}^1 & UA_{w_3}^1 & UA_{w_4}^1 \end{bmatrix}^T$$

$$\theta_2 = \begin{bmatrix} C_z^2 & UA_{w_1}^2 & UA_{w_2}^2 & UA_{w_3}^2 & UA_{w_4}^2 \end{bmatrix}^T \quad (14)$$

se vyskytuje tzv. komplikující (sdílená) proměnná (červeně označena i na obr. 3). Tato proměnná reprezentuje tepelnou vodivost vzájemné zdi mezi zónami, tudíž není překvapivé, že je součástí obou *lokálních optimalizačních podproblémů*. Vzniká tedy další přirozená podmínka problému (13) – rovnost sdílených parametrů v optimu:

$$\theta_1^*(3) = \theta_2^*(5) \quad \text{neboli} \quad UA_{w_2}^{1*} = UA_{w_2}^{2*} \quad (15)$$

Tento typ proměnné označujeme také jako *veřejnou* proměnnou, protože vstupuje do více lokálních podproblémů. Na rozdíl od zbylých proměnných v (14), které jsou tzv. *privátní* ve vztahu k lokálnímu podproblému. Abychom toto rozlišili, zavedeme vektor veřejných proměnných i -tého lokálního podproblému $\theta_{p_i} \in \mathbb{R}^{n_{p_i} \times 1}$, $n_{p_i} \leq n_{p_i}$ kde dimenzi vektoru θ_{p_i} resp. θ_i značí n_{p_i} a n_{p_i} . Nyní definujeme matici $S_i \in \mathbb{R}^{n_{p_i} \times n_{p_i}}$, která vybírá veřejné proměnné z vektoru parametrů θ_i :

$$\theta_{p_i} = S_i \theta_i \quad (16)$$

Podmínku (15) tak v obecnosti přepíšeme do $\theta_{p_1}^* = \theta_{p_2}^*$. Ztrátovou funkci problému (13) s tímto rovnostním omezením můžeme poté přeformulovat užitím tzv. duálních optimalizačních proměnných (Lagrangeových multiplikátorů) do podoby:

$$V(\theta_1, \theta_2, \lambda) = V_1(\theta_1) + V_2(\theta_2) + \lambda^T (\theta_{p_1} - \theta_{p_2}) \quad (17)$$

Nyní již lze problém, asociovaný s (17), separovat s využitím *duální dekompozice* [10] na dva lokální podproblémy:

$$q_i(\lambda_i) = \min_{\theta_i} V_i(\theta_i) + \lambda_i^T \theta_{p_i}, \quad i = 1, 2 \quad (18)$$

Kromě toho vzniká tzv. *globální optimalizační problém*:

$$\max_{\lambda_1, \lambda_2} q_1(\lambda_1) + q_2(\lambda_2) \quad (19)$$

za podm. $\lambda_1 + \lambda_2 = 0$

který zajišťuje konvergenci sdílených parametrů a je řešen standardními iterativními gradientními metodami:

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k + \alpha^k (\theta_{p_1}^{k*} - \theta_{p_2}^{k*}) \quad (20)$$

kde α^k je velikost kroku v k -té iteraci – ta může být konstantní nebo variabilní. V případě více zón, kde každá má více sdílených proměnných, je postup obdobný a je podrobně popsán v [10].

Identifikace z dat pokročilého simulátoru

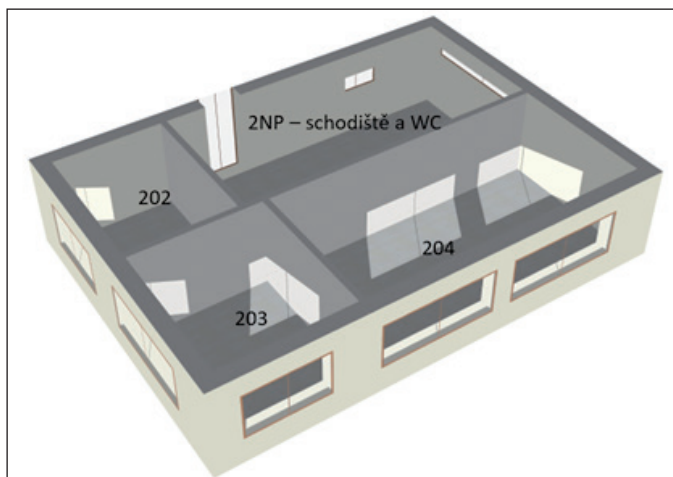
Nejprve uvedeme způsob, jak vyhodnotit kvalitu identifikovaného modelu. Hojně užívanou relativní metrikou, která vyjadřuje shodu měřených dat se simulací identifikovaného modelu, je tzv. *Normalized Root Mean Square Error (NRMSE)*:

$$fit_{NRMSE} = \left(1 - \frac{\|Z - Y\|_2}{\left\| Z - \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} Z_k \right\|_2} \right) 100 \quad [\%] \quad (21)$$

K ověření funkčnosti algoritmu byl zvolen 4zónový „high fidelity“ simulační model vytvořený v programu Design Builder (za poskytnutí výsledných dat ze simulace tímto děkuji Ing. Miroslavu Urbanovi, Ph.D.). Tento model simuluje reálný provoz budovy včetně fluktuace osob v zónách, solárních zisků okny a tepelných zisků z osvětlení a přístrojového vybavení. Všechny tyto tepelné vlivy byly brány jako neměřené (tedy poruchy působící na systém), jako měřené byly uvažovány pouze tepelné zisky z výměníků (viz obr. 5 až 7).

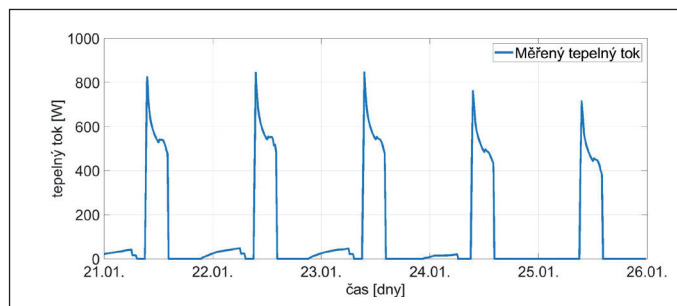
Schéma modelu budovy je na obr. 4. Nachází se zde 4 zóny, které si pro další potřeby zjednodušeně označíme takto:

- zóna č. 1: 2. NP – schodiště a WC,
- zóna č. 2: 202,
- zóna č. 3: 203,
- zóna č. 4: 204.



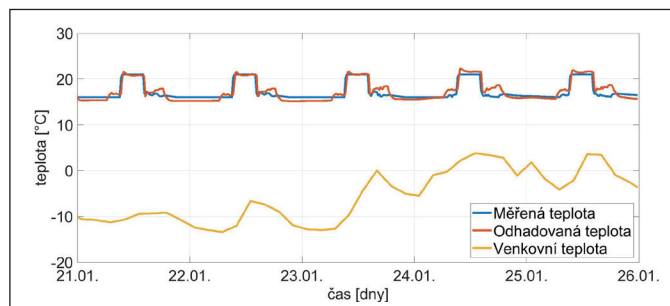
Obr. 4 Schéma modelu budovy vytvořeného v Design Builderu

Fig. 4 Building model scheme created in Design Builder



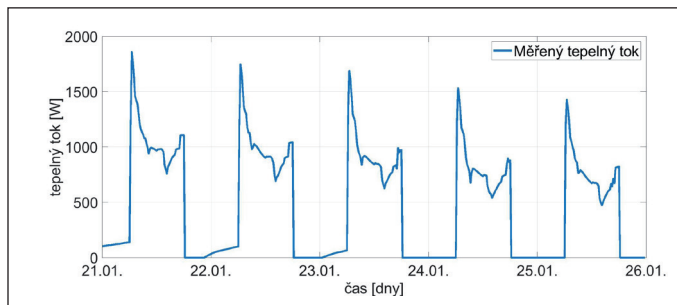
Obr. 5 Měřený tepelný tok z výměníku do zóny č. 2

Fig. 5 Measured heat flow from the heat exchanger to the zone 2



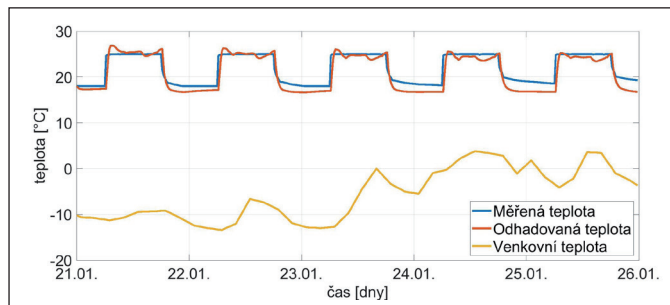
Obr. 8 Zóna č. 2: fit = 49,45 %

Fig. 8 Zone nr. 2: fit = 49.45 %



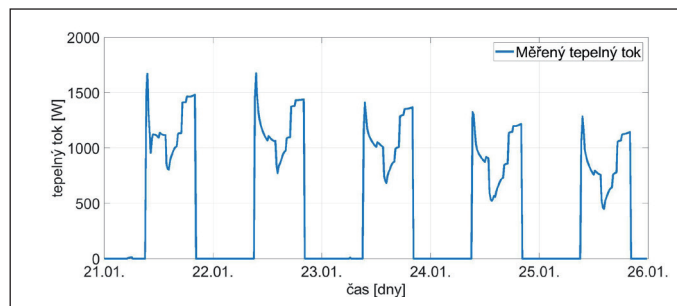
Obr. 6 Měřený tepelný tok z výměníku do zóny č. 3

Fig. 6 Measured heat flow from the heat exchanger to the zone 3



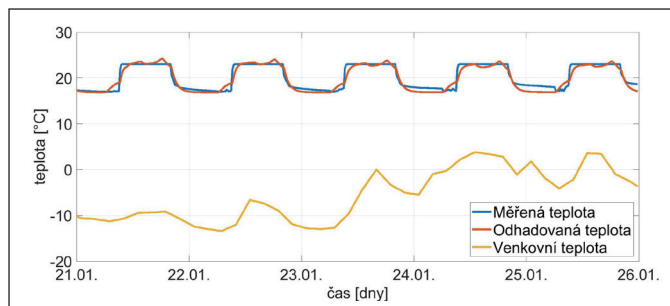
Obr. 9 Zóna č. 3: fit = 50,9 %

Fig. 9 Zone nr. 3: fit = 50.9 %



Obr. 7 Měřený tepelný tok z výměníku do zóny č. 4

Fig. 7 Measured heat flow from the heat exchanger to the zone 4

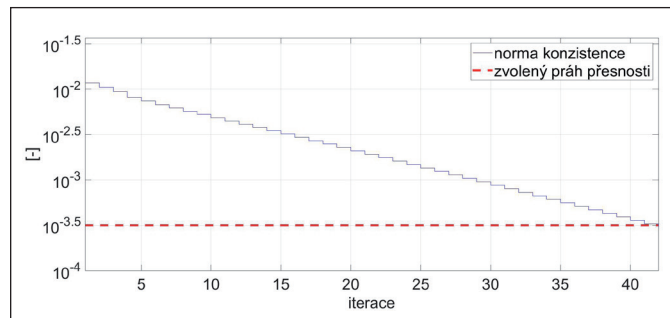


Obr. 10 Zóna č. 4: fit = 68,07 %

Fig. 10 Zone nr. 4: fit = 68.07 %

Algoritmus distribuované identifikace otestujeme na 3 obytných zónách této budovy – na zónách č. 2, 3 a 4 (resp. na obr. 4 označené jako 202, 203 a 204). Jinými slovy, budeme identifikovat tyto 3 zóny, přičemž budou uvažovány i tepelné toky z/do zóny č. 1 (kterou, jelikož se jedná o schodiště atd., nebudeme identifikovat).

Na obr. 8 až 10 jsou uvedena porovnání výsledků simulace identifikovaného modelu s měřeními daty v jednotlivých zónách. V prvních dvou případech dosahovala hodnota shody $NRMSE$ kolem 50 %, v případě zóny č. 4 odpovídalo $NRMSE$ 68 %. Identifikace proběhla na přibližně týdenním vzorku dat s časovým krokem 15 min. Parametry výsledného modelu budovy byly získány po 40 iteracích globálního optimalizačního problému (19). Vývoj normy konzistence sdílených proměnných v závislosti na těchto iteracích je vyobrazen na obr. 11. Tato norma je definována jako eukleidovská norma z rozdílu dvou vektorů, jejichž souřadnice jsou tvořeny vzájemně si odpovídajícími dvojicemi sdílených proměnných (viz (15)). Tato norma slouží jako globální měřítko vzájemné konzistence jednotlivých lokálních modelů a vyjadřuje míru, jak se tyto modely přibližují globálnímu modelu budovy.



Obr. 11 Vývoj konzistence sdílených proměnných (logaritmické měřítko)

Fig. 11 Development of consistency of shared variables (logarithmic scale)

ZÁVĚR

V článku byla představena grey-box metoda modelování budov s využitím tepelných RC obvodů. Následně byl problém identifikace parametrů rozložen duální dekompozicí na jednotlivé lokální optimalizační (identifikační) problémy. Tím lze k celkové identifikaci budovy přistupovat ryze

distribuovaným způsobem s lokální koordinací sdílených (veřejných) parametrů.

V případě, že by proběhla jen lokální identifikace zón bez následné koordinace, disponovali bychom sice též lokálními modely zón, jimiž lze provozovat distribuovanou regulaci, nicméně tyto modely by byly značně suboptimální a nepřesné vzhledem k celkovému modelu budovy.

Představená metoda s koordinací je způsobem, jak získat lokální modely, které se zároveň velmi blíží celkovému modelu budovy.

Tato metoda navíc přináší možnost provádět výpočty velikostně malých lokálních modelů paralelně na mnoha zařízeních s malým výpočetním výkonem. Tato zařízení s malým výpočetním výkonem poté mohou využívat zkalibrovaného lokálního modelu zóny, který může být v případě potřeby aktualizován, pro prediktivní regulaci, a tím snížit provozní náklady při zachování stejného komfortu.

Výhodou představeného postupu je, že lokálně aproximující model pro prediktivní regulaci vzniká i bez potřeby komunikace/koordinace mezi zařízeními. Koordinací pak lze zajistit globálně přesnější model vedoucí k obecně celkově vyšší energetické úspoře.

Kontakt na autora: tomas.baumelt@cvut.cz

Poděkování: Tato práce vznikla za finanční podpory MŠMT v rámci programu NPU I č. LO1605 – Univerzitní centrum energeticky efektivních budov.

Použité zdroje:

- [1] PRÍVARA, S., ŠIROKÝ, J., FERKL, L., CIGLER, J. Model predictive control of a building heating system: The first experience. *Energy and Buildings*. 2011, sv. 43, č. 2, pp. 564–572.
- [2] SCOTTON, F. Physics-based modeling and identification for HVAC systems. *Control Conference (ECC), IEEE*. 2013.
- [3] BOHLIN, T. Practical grey box process identification. Springer, 2006.
- [4] BÄUMELT, T. *Distributed Building Identification*. Prague, 2016. Master's Thesis. Czech Technical University in Prague.
- [5] DOSTÁL, J., HAVLENA, V. Modeling, optimization and analysis of hydronic networks with decentralized pumping. In: *Automatic Control Conference (CACS)*. 2014 CACS International. IEEE, 2014.
- [6] HERMAN, I., KNOTEK, Š., DOSTÁL, J., PRAJZNER, V. *Stability of Hydronic Networks With Independent Zone Controllers*. IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY. 2018.
- [7] NELLIS, G., KLEIN, S. *Heat Transfer*. Cambridge University Press, 2009.
- [8] LJUNG, L. *System Identification (2Nd Ed.): Theory for the User*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 1999.
- [9] De CARLO, R. *Linear Systems: A State Variable Approach with Numerical Implementation*. New Jersey: Prentice Hall, 1989.
- [10] SAMAR, S., BOYD, S., GORINEVSKY, D. Distributed estimation via dual decomposition. In: *European Control Conference (ECC)*. IEEE. 2007.

Inovace vzduchových výústek

V závěru roku 2016 došlo k fúzi společnosti FläktWoods se společností Denco Happel do skupiny FläktGroup se sídlem v Herne v Severním Porýní-Vestfálsku. Výústky CleanVent pro ventilátory nejen skupiny FläktGroup využívají nanotechnologickou úpravu povrchů – nanopovlaky Avalon s lotosovým efektem, které odpuzují nečistoty. Sol-gel povlaky Avalon jsou výsledkem výzkumu finské firmy Milidyne Oy. Povlaky jsou i energeticky účinné, neboť proud vzduchu je jimi volně veden bez ztráty tlaku. Čisté výústky s nanopovlaky dodávají čistý vzduch, mají estetický vzhled, nízké nároky na údržbu a jsou vhodné zejména pro farmacie, nemocnice, laboratoře, potravinářství a mikroelektroniku.

Pramen: CCI 11/2017, s. 4

(AB)



Společnost pro
techniku prostředí

Nabídka publikací vydaných Společností pro techniku prostředí

Název publikace	Rok vydání
Větrání škol v souvislostech	2017
Příprava teplé vody	2017
Hodnocení tepelných čerpadel ve světle nové legislativy	2016
Kontrola klimatizačních systémů, kontrola kotlů a rozvodů tepelné energie – metodické pokyny 2014	2014
Bezkontaktní způsoby měření teploty	2014
Solární tepelné soustavy	2009
Názvoslovný výkladový slovník z oboru Technika prostředí Č-A-N, A-Č-N, N-Č-A	2008
Vzduchotechnické systémy pro čisté prostory operačních sálů	2008
Otopné soustavy teplovodní	2008
Regulace ve vytápění	2007
Průmyslové otopné soustavy	2005
Měření tepla, indikace a rozdělování úhrady za vytápění a ohřev TUV	2003
Větrání kuchyní	2000
Vodní pára ve vytápění	2000
Výkresová dokumentace ve vytápění	1999

Více informací o publikacích: <http://www.stpcr.cz/cz/publikace>

Objednávky publikací na dobírku, na fakturu (nad 200 Kč) vyřizuje:

Univerzitní knihovnictví odborné literatury

Technická 6, 160 00 Praha 6 – Dejvice

telefon: 224 355 003, fax: 233 332 642

e-mail: Vera.Mikulkova@ctn.cvut.cz