

Ing. Jan ŠIROKÝ^{1,4}Ing. Lukáš FERKL, Ph.D.²Ing. Miloš LAIN, Ph.D.³¹Energocentrum Plus, s. r. o.²ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická,

Katedra řídicí techniky

³ČVUT v Praze, Fakulta strojní,

Ústav techniky prostředí,

⁴ZČU v Plzni, Katedra kybernetiky,

Fakulta aplikovaných věd

Recenzent

Ing. Luboš Hach, Ph.D.

Identifikace otopného systému Crittall pro funkci chlazení místností Fakulty strojní ČVUT v Praze

Identification of the Ceiling Cooling System at CTU in Prague

Budova fakulty strojní ČVUT v Praze – Dejvicích je od roku 1961 vytápěna teplovodním systémem vytápění umístěným ve stropě (systém „Crittall“). V jednom bloku bylo instalováno zařízení umožňující použití rozvodů stropního vytápění k stropnímu sálavému chlazení. Protože bylo rozhodnuto přistoupit k optimalizaci tohoto systému, byla prvním krokem jeho identifikace.

Vzhledem ke komplikovanému fyzikálnímu popisu celého systému a k dostatečně množině naměřených dat bylo rozhodnuto systém identifikovat statistickými metodami, konkrétně metodami Subspace identifikace (4SID) implementovanými ve specializovaných knihovnách v prostředí Scilab, jež mají tu výhodu, že kromě samotného modelu navrhnou i pozorovatele stavu. Výsledný identifikovaný model vykazuje na ověřovacích datech odchylku do 1 °C, v okolí pracovního bodu do 0,5 °C. Tento model je již vhodný k nasazení ve vícerozměrných regulátorech, jako je např. MPC.

Klíčová slova: stropní chlazení, identifikace, subspace metody

The building of the Faculty of Mechanical Engineering, CTU in Prague – Dejvice, has been heated by a ceiling radiant heating system („Crittall“ system) since 1961. One building block has been equipped by means which enable to use the pipes of the radiant heating system for ceiling radiant cooling. As optimization of this system is desired, the first step to be performed is the identification.

Because of a complicated physical description of the entire system and a set of measured data which is large enough to perform statistical identification, a decision was made to identify the system by subspace identification methods (4SID). Scilab's special libraries were used that not only identify the system model, but also design a state observer. The resulting identified model shows maximal deviation of 1 °C on verification data set and even 0,5 °C around the linearization setpoints. Such model can be used in modern multidimensional controllers, such as model-based predictive controllers.

Keywords: ceiling cooling, identification, subspace methods

ÚVOD

S rostoucími cenami energií jsou energetické úspory při vytápění a chlazení budov v dnešní době velmi aktuální. Přitom ušetřit nelze pouze vhodným technologickým dovybavením budov (např. zateplením), ale i nasazením moderních algoritmů automatické regulace. Pro jejich úspěšnou implementaci je velmi vhodné mít počítačový model tepelného chování budovy.

Počítačové modelování budov a systémů techniky prostředí mají řadu podob. Při projektování a optimalizaci systémů se v široké míře používají simulační nástroje vycházející z matematického popisu fyzikálních dějů. Zadááním pro simulace jsou pak fyzikální parametry modelované soustavy a případná naměřená data se mohou použít pro kalibraci modelu (zpracování některých vstupních hodnot).

V tomto článku je prezentován rozdílný způsob modelování budovy a systému. Simulační model, který bude sloužit pro predikci reakce systému na regulační zásahy a energetické optimalizaci regulace, je založen na obecném matematickém popisu chování soustavy. Identifikace takového modelu je potom provedena statistickými metodami, které na základě naměřených dat určí dynamiku systému. Zde prezentovaná metoda subspace identifikace je navíc schopna sama určit řád systému, čímž dále snižuje nároky na apriorní znalost o identifikovaném systému.

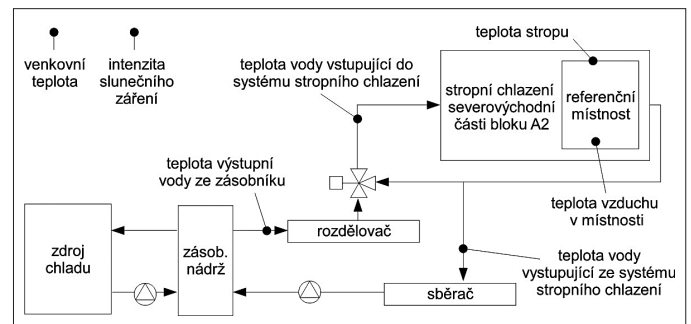
POPIS SYSTÉMU

Teplovodní systém „Crittall“, který je použit na budově Fakulty strojní a Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze – Dejvicích, byl podle [1] patentován britským profesorem Arthurem H. Bakerem v roce 1907. V roce 1909 jej od něj koupila firma Crittall (zal. 1884), které jej dále vyvíjela, viz např. pa-

tentované vylepšení podané R. G. Crittallem a J. L. Musgravem [2]. Systém byl ve Velké Británii populární kolem první světové války, ale opravdového celosvětového rozmachu dosáhl až po druhé světové válce, částečně zásluhou slavného amerického architekta Franka Lloyda Wrighta. Systém se používal také v Československu, v případě budovy ČVUT se jedná konkrétně o topný (resp. chladicí) had z kovových trubek zabudovaný v monolitickém betonovém stropě.

V případě Fakulty strojní ČVUT v Praze – Dejvicích se s individuální regulací, tj. regulací otopných hadů v jednotlivých místnostech ani v projekci nepočítalo, a proto by byla velmi obtížná a díky technickému stavu regulačních armatur v jednotlivých místnostech je nyní již zcela nemožná. Jednotlivé segmenty budovy se proto vždy regulují centrálně.

Sálavý systém chlazení (ale i vytápění) s akumulací hmotou je obecně obtížné regulovat, konkrétní zkušenosti jsou uvedeny například v článku [3] – systém má totiž díky akumulaci hmotě značnou tepelnou kapacitu (setrvačnost). Regulace je o to obtížnější, že kromě požadavku na dodrže-



Obr. 1 Zjednodušené schéma cirkulace vody v systému stropního chlazení

ní optimálních parametrů prostředí v chlazených místnostech musí zohlednit i omezení povrchové teploty stropu teplotou rosného bodu vnitřního vzduchu, aby na stropě nedocházelo ke kondenzaci vody.

Zjednodušené schéma systému stropního chlazení je znázorněno na obr. 1. Zdrojem chladu je kompaktní chladicí jednotka (chiller), z něhož je chladicí voda vedena do zásobníkové nádrže. Zde dochází ke smíchování a teplota vody vedené do jednotlivých chladicích okruhů je vyšší než teplota ze zdroje. Přesná regulace teploty chladicí vody pro jednotlivé segmenty (blok A2 budovy Fakulty strojní je rozdělen na dva segmenty – východní a západní) je zajištěna trojcestnou směšovací regulační armaturou se servopohonem. Chladicí voda o teplotě cca 20 °C je potom přiváděna do jednotlivých stropních hadů. Pro každý okruh je identifikován jeden měřicí bod v referenční místnosti, kterou je učebna v druhém patře v severní části bloku A2. V této místnosti je měřena i povrchová teplota stropu v části, kde jsou umístěny otopné (chladicí) hady. Nastavení regulačního ventilu je tedy akční veličinou pro regulaci systému stropního chlazení každého okruhu.

DATA PRO IDENTIFIKACI A JEJÍ OVĚŘENÍ

K identifikaci bylo vybráno stropní chlazení na monobloku A2 budovy ČVUT v Praze – Dejvicích. Data jsou měřena systémem RcWare Vision a ukládána do SQL databáze s periodou 3 minuty. Na vybrané technologii je měřena prostorová teplota:

- v referenční místnosti,
- stropu v referenční místnosti,
- teplota vody vstupující do systému stropního chlazení poloviny bloku A2,
- teplota vody vystupujícího ze systému stropního chlazení poloviny bloku A2,
- teplota výstupní vody ze zásobníku,
- poloha klapky trojcestného ventilu, který smíchuje vodu vystupující ze systému stropního chlazení a výstupní vody ze zásobníku,
- teplota venkovního vzduchu
- intenzita slunečního záření.

Všechny teploty jsou měřeny průmyslovými teploměry Sensit Ni1000. Venkovní teplota je počítána jako průměr z 11 teplotních čidel rozmístěných v areálu ČVUT v Dejvicích. Věrohodnost dat měřených senzorem intenzity slunečního záření bylo nutné nezávisle ověřit, neboť nebyla nikdy porovnána s jiným měřením a měla pouze informativní charakter. Srovnání s údaji ze Solární laboratoře z Ústavu techniky prostředí Fakulty strojní ČVUT v Praze ukázalo, že údaje měřené v systému RcWare se jen mírně liší od kalibrovaného měření a tudíž jsou pro identifikaci použitelné.

Pro identifikaci systému jsme měli k dispozici data naměřená mezi 1. červnem a 7. srpnem 2008, kdy byl dostatek dní s venkovními teplotami nad 30 °C, ve kterých je stropní chlazení aktivní. Při bližším rozboru dat se bohužel ukázalo, že v datech je poměrně hodně výpadků. Tab. 1 ukazuje četnosti period vzorkování T_d – vidíme zde například, že nejvíce dat bylo vzorkováno s periodou kolem 3 minut, ovšem v datech je 23 výpadků měření delších než jedna hodina.

Tab. 1 Četnosti period vzorkování T_d v naměřených datech

T_d [min]	0–2	2–3	3–4	4–60	> 60
Vzorků	116	21482	5370	151	23

Z dat jsme tedy vybrali konzistentní úseky, na které jsme měli následující kritéria:

- Ve výběru dat nesmí být výpadek delší než 2 hodiny.
- Výběr dat musí mít alespoň 3000 vzorků (téměř týden při vzorkování po 3 minutách).

Tomuto vyhověly celkem 3 výběry (13. – 19. 6.; 24. 6. – 1. 7. a 4. 7. – 14. 7. 2008). V prvním výběru bohužel nebyly dostatečně vysoké venkovní teploty, takže stropní chlazení nebylo aktivní. Pro identifikaci a její ověření tedy zbyly dva výběry, což je ovšem pro naše účely postačující.

Identifikovat budeme pouze referenční místnost (obr. 1). Trojcestný ventil totiž není problém regulovat klasickým regulátorem (např. PID), takže za ním dostáváme velmi přesně v podstatě libovolnou teplotu chladicí vody. Pro identifikaci systému chlazení tedy použijeme jako vstupní a výstupní proměnné následující veličiny:

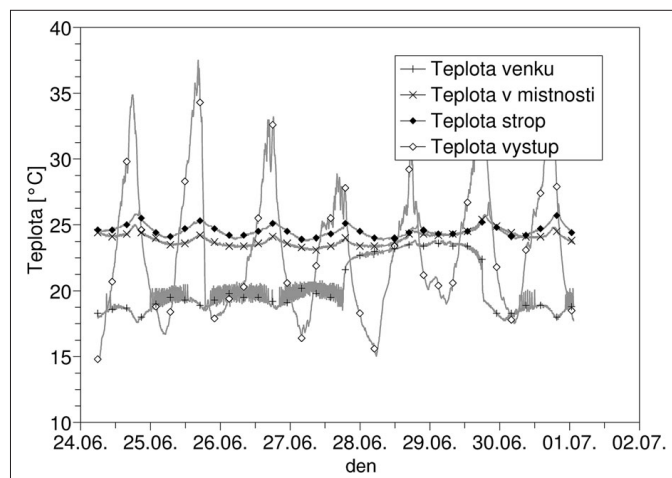
Vstupní proměnné:

- teplota výstupní vody ze zásobníku,
- venkovní teplota vzduchu,
- intenzita slunečního záření.

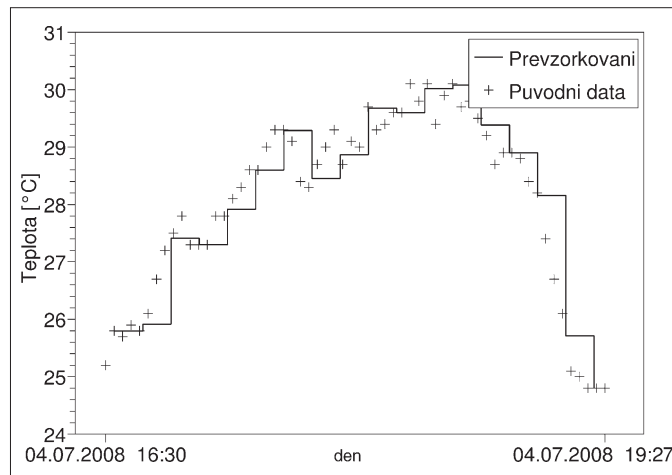
Výstupní proměnné povrchová teplota:

- teplota stropu v referenční místnosti
- teplota v referenční místnosti

Dále bylo třeba se rozhodnout, který výběr z dat použijeme pro identifikaci a který pro její ověření. Pro identifikaci metodami subspace (ale i pro jiné metody statistické identifikace) obecně platí, že by systém měl být co nejvíce vybuděn na různých módech. V praxi to znamená, že průběh vstupních proměnných by měl být „pestrý“. Tomu nejlépe odpovídá druhá sada dat (24. 6. – 1. 7. 2008, obr. 2), která měla i příznivější směrodatnou od-



Obr. 2 Data použitá pro identifikaci systému (24. 6. až 1. 7. 2008).



Obr. 3 Ukázka převzorkování původních dat
Původní vzorkovací interval byl okolo 180 s, nový je 600 s

chylku periody vzorkování T_d (tab. 2). Třetí sadu dat jsme se rozhodli použít jako ověřovací.

Dalším problémem byla nepravidelnost ve vzorkovacích periodách T_d (tab. 1). Střední hodnoty a směrodatné odchylky pro identifikační a ověřovací sadu dat jsou uvedeny v tab. 2.

Tab. 2 Střední hodnoty a směrodatné odchylky periody vzorkování T_d [min] v identifikační a ověřovací sadě dat

Sada	Střední hodnota	Směr. odch.
Identifikační	3,00	0,02
Ověřovací	3,01	0,19

Vzhledem k požadavkům na vstup do subspace identifikace jsme se rozhodli převzorkovat data s novou periodou 600 s a s použitím lineární interpolace. Důvodů pro toto rozhodnutí bylo několik.

Perioda 600 s pro identifikaci postačuje, zvláště s ohledem na různé výpadky měření. Jako interpolaci jsme uvažovali spline a lineární interpolaci, ale vzhledem k tomu, že mezi dvěma různými měřeními nejsou velké rozdíly, nepřinesla by spline interpolace téměř žádné zpřesnění. Při výpadcích měření se navíc spline interpolace nemusí zachovat zcela reálně, může docházet k různým zákmitům daným předchozími a následujícími daty. Proto jsme se rozhodli použít lineární interpolaci, která těmito problémy netrpí.

Další variantou bylo použít průměrné hodnoty na určitém intervalu, vzhledem k nepravidelnosti ve vzorkování by to však přinášelo další problémy, např. jak vážit krajní hodnoty. Opět s ohledem na malé změny mezi jednotlivými měřeními jsme se rozhodli použít prostou hodnotu lineární interpolace v novém okamžiku vzorkování. Ukázka převzorkovaných dat je uvedena v obr. 3.

SUBSPACE IDENTIFIKACE

Metody subspace identifikace (občas zkracované 4SID – Subspace State-Space System Identification) jsou v poslední době velmi populární díky tomu, že poskytují velmi výkonný nástroj pro identifikaci větších systémů. V dnešní době existuje celá řada zdrojů, které se jí zabývají, v této práci budeme vycházet z knihy [4].

Principem subspace metod se zde nebudeme podrobně zabývat, neboť je poměrně komplikovaný – odkazujeme opět na literaturu [4], pěkný přehled poskytuje [5], v češtině je potom dobrým pramenem [6]. V zásadě jde o metody pro identifikaci parametrů lineárních stavových modelů z experimentálních vstupně-výstupních dat, poskytují tedy alternativu k OEM, ARX či ARMAX modelům a identifikacím založených na MS (Means Square, metoda nejmenších čtverců) a ML (Maximum Likelihood, maximální věrohodnost) odhadech. Vycházejí ze standardního stavového modelu s uměle přidaným šumovým vstupem,

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + B\tilde{u}_k + f_k \quad \text{pro } k \geq 0; x_k \in \mathbb{R}^n \\ y_k &= Cx_k + D\tilde{u}_k + v_k \quad \tilde{u}_k \in \mathbb{R}^m; y_k \in \mathbb{R} \\ u_k &= \tilde{u}_k + w_k \end{aligned} \quad (1)$$

kde x je stav systému, u, y jsou vstup a výstup, A, B, C, D jsou matice systému a f, v a w jsou šумы (korelované, ergodické, bílé, s nulovou střední hodnotou).

Hlavní výhody *subspace metod* uvádí např. [6]:

- stejná složitost identifikace pro SISO a MIMO systémy;
- malý počet uživatelem nastavovaných parametrů;
- schopnost odhadu řádu systému;

- numericky robustní implementace (SVD, QR faktorizace);
- implicitní redukce řádu modelu.

Systém jsme identifikovali v prostředí Scilab, které má pro subspace identifikaci k dispozici celou knihovnu „Identification“.

Jak jsme uvedli výše, subspace jsou vůči uživateli nenáročné a nepožadují příliš vstupních informací. V zásadě jsou potřeba pouze následující údaje:

- vstupní a výstupní data u, y ;
- řád systému N (lze jej odhadnout automaticky);
- počet řádkových bloků S blokových Hankelových matic, ze kterých se počítá řešení.

Vstupní a výstupní data u, y mohou být zatížena bílým, ergodickým, vzájemně korelovaným bílým šumem. Lepších výsledků identifikace se dosáhne, pokud jsou vstupně-výstupní data dostatečně „pestrá“ (tj. systém má dostatečně vybuzené všechny módy) a je u nich odstraněna střední hodnota. Odstranění střední hodnoty je zvláště důležité pro nelineární systémy, abychom získali lineární model z okolí určitého pracovního bodu.

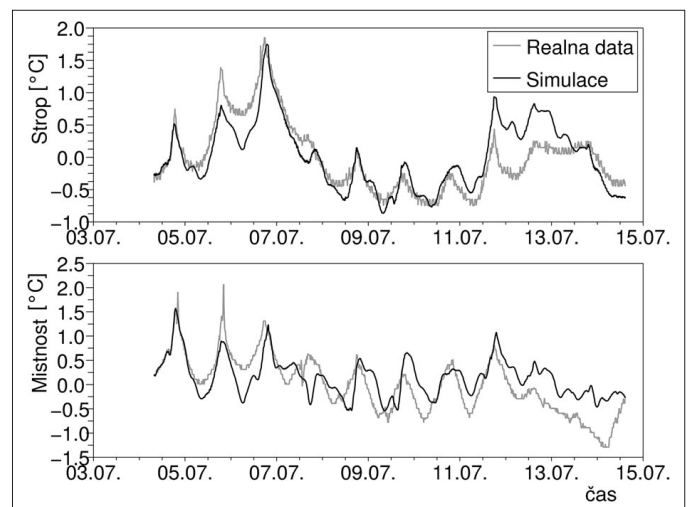
Řád systému N může vyplynout přímo z identifikačního procesu, ale je možné jej i přímo zadat. Subspace metody přitom nejsou zdaleka tak citlivé na jeho odhad jako identifikace ARX či ARMAX modelů (ML a LS odhady).

Počet řádkových bloků S blokových Hankelových matic udává konstrukci vnitřních matic subspace metod, z jejichž podprostorů se potom počítají parametry stavového modelu identifikovaného systému (odtud název subspace). Tímto parametrem vlastně celou identifikaci ladíme.

Volání identifikace ve Scilabu [7] je skutečně velmi jednoduché, jak je zřejmé z následující ukázky kódu:

```
--> [R,N] = findR(S,y,u);
--> model = findABCD(S,N,2,R);
--> model.X0 = inistate(model,y,u).
```

V prvním kroku získáme horní trojúhelníkovou matici R složených blokově-diagonálních Hankelových matic a odhad řádu systému N . Ve druhém kroku identifikujeme model (musíme mu říci, že systém má 2 výstupy), ve třetím kroku potom počáteční stav x_0 . Při identifikaci našeho systému stropního chlazení jsme zjistili, že nejlepšími výsledky dosáhneme při nastavení parametrů $S = 65$ a $N = 8$. Výsledky identifikace ukazuje obr. 4.



Obr. 4 Ověření správnosti identifikace systému na ověřovacích datech (4.–14. 7. 2008)

VYUŽITÍ MODELU PRO MPC REGULÁTOR

Jak jsme uvedli v úvodu tohoto článku, motivací pro identifikaci modelu stropního chlazení je jeho použití v MPC řízení, který jej má na Fakultě strojní ČVUT v Praze – Dejvicích řídit. MPC řízení (Model-based Predictive Control) je řídicí strategie původně nasazená v 70. letech na ropných plošinách, která však dnes nachází uplatnění v celé řadě průmyslových odvětví. Princip řízení je založen na principu hledání řídicí posloupnosti u_k na horizontu predikce T_p minimalizující kritérium

$$J = \sum_{k=0}^{T_p-1} ((y_k - r_k)^T Q (y_k - r_k) + u_k^T R u_k) \quad (2)$$

kde y_k je predikce výstupu systému odvozeného ze stavového modelu systému (1), r_k je požadovaná hodnota výstupu (referenční signál) a Q , R jsou váhové matice. Výhodou MPC řízení je možnost jeho implementace kvadratickým programem,

$$\min_x \left(\frac{1}{2} x^T H x + f x \right) \begin{cases} A x \leq b \\ A_{eq} x = b_{eq} \\ x_{lower} \leq x \leq x_{upper} \end{cases} \quad (3)$$

tj. hledáme takové x , které minimalizuje penalizační funkci $\frac{1}{2} x^T H x + f x$, kde $x^T H x$ je její kvadratická část (H je váhová matice) a $f x$ je její lineární část (f je váhový vektor). Kvadratický program (3) má dále omezující podmínky na hledané x , které lze vyjádřit maticovými rovnicemi $Ax \leq b$ (omezení typu nerovnost), $A_{eq} x = b_{eq}$ (omezení typu rovnost) a $x_{lower} \leq x \leq x_{upper}$ (omezení typu horní a dolní mez).

Jak je vidět, do řízení je možné zadat i omezující podmínky (např. omezit řídicí nebo výstupní veličinu), což je značná výhoda oproti ostatním regulátorům, jako jsou PID nebo LQG (Linear-Quadratic-Gaussian). Výsledky identifikace, jak je ukazuje obr. 4, jsou z tohoto hlediska naprosto postačující.

Dosavadní řízení stropního chlazení se děje zásahem operátora na základě zkušeností s provozováním tohoto systému. S využitím modelu systému a předpovědi venkovní teploty a intenzity slunečního záření však bude moci systém řídit zcela automaticky, navíc nám MPC řízení zaručuje – v rámci kritéria (2) – energetickou optimalitu. Díky predikci si bude umět systém v případě potřeby optimálně „předchladit“ – tohoto principu se využívalo i doposud v rámci ručního ovládání, ale obtížné bylo stanovit právě optimální dobu, po kterou má předchlazení probíhat. MPC řízení zde přináší ještě jednu nezanedbatelnou výhodu, umí totiž vhodným nastavením

váhových matic Q a R v rovnici (2) zohlednit i různé ceny energií v různých denních dobách (noční, denní, špičková apod.).

ZÁVĚR

Použití subspace identifikace se ukázalo jako vhodná metoda pro identifikaci modelu pro účely MPC řízení stropního chlazení, zvláště pokud tuto metodu porovnáme s alternativou, kdy by bylo třeba vytvářet zjednodušený fyzikální model. Po vyzkoušení MPC řízení v prostředí Scilab je dalším cílem projektu integrace MPC řízení do knihovny funkčních bloků RcWare SoftPLC. Při přechodu na tuto platformu bude nutné přistoupit k výraznému snížení výpočetní náročnosti řízení, například předpočítáním akčních zásahů do tabulky.

Poděkování

Tento projekt byl realizován za finanční podpory z prostředků státního rozpočtu prostřednictvím Ministerstva průmyslu a obchodu v rámci grantu 2A-1TP1/084, „Integrace systémů budov, výzkum a aplikace inteligentních algoritmů ovlivňujících spotřebu energií budov a obytných domů“. Některá měření a analýzy byly podpořeny výzkumným záměrem MSM 6840770011.

Kontakt na autory: jan.siroky@rcware.eu, Milos.Lain@fs.cvut.cz
ferkl@control.felk.cvut.cz

Použité zdroje:

- [1] T. Napier Adlam, Radiant heating. Second Edition, The Industrial Press, New York, 1949.
- [2] Crittall, R. G., Musgrave, J. L., *Heating and cooling of buildings*. GB Patent No. 210880, 1927.
- [3] Lain, M., Drkal, F., Hensen, J., Zmrhal, V. Low energy cooling techniques for retrofitted office buildings in Central Europe. In: *Ventilation and Retrofitting*, Brussels, 2004, s. 79–84.
- [4] Zhu, Y. *Multivariable System Identification for Process Control*, kap. Michel Verhaegen: Sub-space Model Identification of MIMO Processes, s. 199–216. 1st ed., Elsevier, 2001. ISBN 0-080-43985-3
- [5] De Cock, K., De Moor, B. Subspace identification methods. In: *EOLSS, UNESCO Encyclopaedia of Life Support Systems*, vol. 1, kap. Control systems, robotics and automation, s. 933–979, Oxford: Eolss Publishers Co., Ltd., 2003. ISBN 93-3-103999-7
- [6] Trnka, P. <pavel@trnka.name> *Subspace Identification Methods* [HTML dokument]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2007 [cit. 9. 1. 2009]. Dostupné z: <http://www.trnka.name/download/subspace/oaf_slides2.pdf>.
- [7] *Scilab On Line Help* [online]. Paris: INRIA, 2008 [cit. 9. 1. 2009]. Dostupné z: <http://www.scilab.org/product/man/>. ■



VENTILÁTORY

www.casals.cz

závan svěžího vzduchu

SORKE s.r.o.
Hradištská 407
533 52 Pardubice,
Tel.: +420 466530804
Fax: +420 466535568
E-mail: casals@casals.cz