

# Modelování a identifikace komponent systému centrálního zásobování teplem

Článek přibližuje důvody a způsob použití moderních nástrojů pro matematické a fyzikální modelování Matlab® a Comsol Multiphysics® k nepřímé identifikaci tepelného výměníku jako významné komponenty systémů centrálního zásobování teplem. Představuje verifikovaný fyzikální model, jehož existenci nepřímá metoda identifikace předpokládá.

V současnosti je v popředí zájmu inteligentní dodávka energií, tj. tepla a elektřiny, spočívající v optimálním řízení okamžitého výkonu zdrojů s kombinovanou výrobou tepla a elektřiny a v řízení výroby, rozvodu a spotřeby energií inteligentními řídicími systémy. Teplo se přitom rozvádí prostřednictvím systémů centrálního zásobování teplem (SCZT), tj. geograficky rozlehlými sítěmi teplovodů a výměníkových stanic zajišťujícími dopravu tepla od jeho zdrojů na místa koncové spotřeby. Jde o systémy dynamické, u nichž se v čase mění skladba zdrojů i míst koncové spotřeby. Není pochyb o tom, že z hlediska technického, ekonomického i ekologického je celospolečensky žádoucí co možná nejvyšší kvalita řízení systémů CZT.

## Inteligentní řízení SCZT s použitím modelů

Hospodárné řízení subsystému výroby a využití tepelné energie spočívá jednak v hospodárném rozdělování zatížení mezi jednotlivé spolupracující zdroje a mezi jednotlivé výrobní jednotky uvnitř těchto zdrojů a jednak v určení vhodné sestavy spolupracujících zdrojů, včetně určení vhodné skladby spolupracujících jednotek uvnitř zdroje, jakož i v určení vhodného ekonomicky podloženého spouštění či odstavení jednotlivých výrobních jednotek, popř. i celých zdrojů.

Ke zvládnutí uvedené úlohy je třeba vytvořit komplexní matematicko-fyzikální model rozlehlých teplotních horkovodních i parních sítí a výrobních zdrojů tepla, který umožní najít nové nekonvenční řídicí algoritmy potřebné k optimálnímu – ze zmíněných hledisek technického, ekonomického a ekologického – řízení komplexního dodavatelského řetězce výroba, doprava + rozvod a spotřeba tepla zejména rozlehlých teplotních soustav. Postup tvorby a způsob využití komplexního modelu SCZT jsou schematicky naznačeny na obr. 1. Cesta ke komplexnímu modelu vede přes modely jednotlivých prvků SCZT.

Systém CZT obsahuje, kromě zdroje tepla, celkem tři tyto základní skupiny prvků:

- předávací výměníkové stanice,
- primární a sekundární potrubní síť,
- odběratelský segment, tj. systém topných těles (radiátorů).

Vlastnosti zmíněných základních prvků mají vliv na procesy distribuce a spotřeby tepelné energie. Stav jednotlivých prvků SCZT je třeba ovlivňovat (řít) tak, aby bylo dosaženo požadovaného optimálního chování celého systému. K tomu je nutné znát stavy (hodnoty parametrů) jednotlivých prvků SCZT, resp. jejich odhady – což znamená prvky identifikovat.

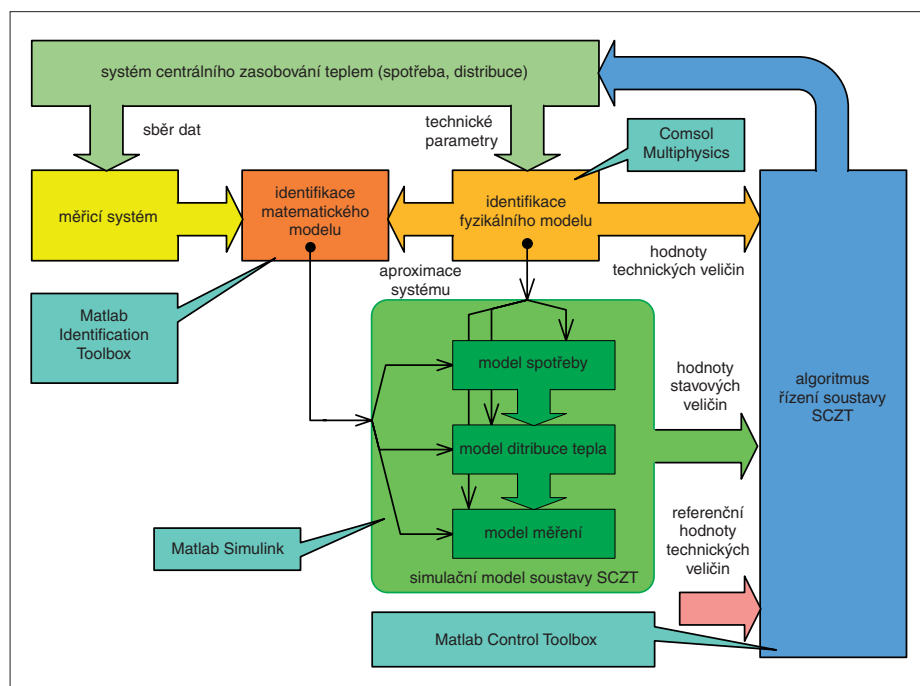
Identifikovat je třeba především nejvýznamnější prvky (komponenty) SCZT z již uvedených základních skupin, tedy:

- tepelný výměník jako hlavní komponentu výměníkové stanice,
- potrubí,
- typické topné těleso (radiátor ústředního topení).

Při identifikaci reálných komponent je třeba měřit, a v tomto ohledu se v rozlehlých SCZT v praxi naráží na značné potíže. Zdroji těchto potíží jsou některé obecné vlastnosti (měřících) systémů. Jde především o tyto jevy:

- dynamické vlastnosti měřícího systému,
- interakci měřícího systému s okolím (mechanická, tepelná a elektromagnetická kompatibilita),
- nelinearititu měřícího systému,
- historickou závislost, tj. změny vlastností měřícího systému v čase.

Východisko se zde nabízí v podobě použití nepřímé metody iden-



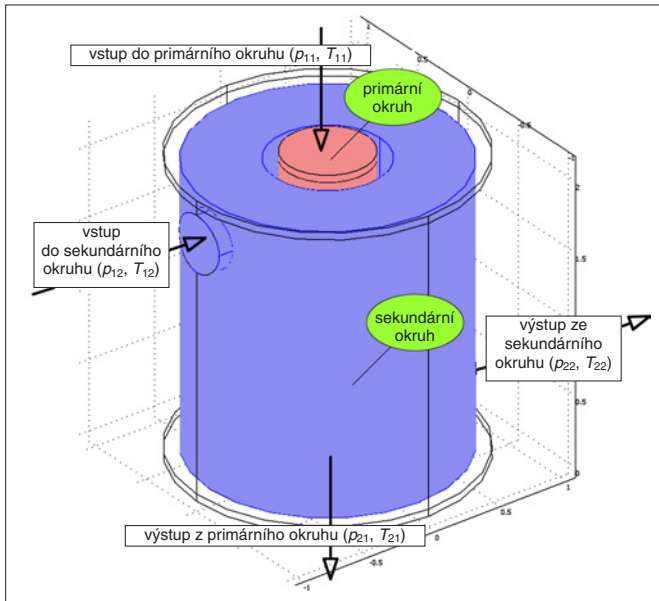
Obr. 1. Struktura procesu identifikace a řízení soustavy CZT

tiifikace prostřednictvím fyzikálního modelu, který je verifikován s použitím modelu matematického.

Další text bude omezen na ukázkou způsobu tvorby obou modelů v případě tepelného výměníku jako nejdůležitější komponenty SCZT z hlediska řízení systému. Fyzikální model výměníku byl vytvořen

Tab. 1. Rozměry uvažovaného trubkového výměníku

| Rozměr                                 | Symbol          | Hodnota (m) |
|--|-----------------|-------------|
| výška                                  | $h$             | 2,00        |
| vnitřní poloměr primární části         | $d_{11}$        | 0,30        |
| vnější poloměr sekundární části        | $d_{12}$        | 0,95        |
| výška vstupu do sekundární části       | $h_{12}$        | 0,70        |
| výška výstupu ze sekundární části      | $h_{22}$        | 0,30        |
| průměr vstupu/výstupu sekundární části | $d_{12}/d_{22}$ | 0,20        |
| tloušťka obalu (sekundární části)      | $t_2$           | 0,05        |
| tloušťka stěny primární trubky         | $t_1$           | 0,05        |



Obr. 2. Geometrie uvažovaného trubkového průtokového výměníku

při použití programu Comsol Multiphysics a matematický (simulační) model při použití nástroje Matlab Identification Toolbox.

Poznamenejme, že při identifikaci a návrhu algoritmů řízení SCZT jako celku se z nástrojů obsažených v prostředí Matlab od firmy The MathWorks vedle již uvedeného nástroje Identification Toolbox dále uplatní nástroje Simulink a Control Toolbox, jak také ukazuje obr. 1.

### Fyzikální model výměníku tepla

Fyzikální model je zdrojem údajů pro stanovení hodnot parametrů matematického modelu vybrané komponenty SCZT, v daném případě jednoduchého trubkového výměníku s geometrií podle obr. 2 a tab. 1.

K určení fyzikálního modelu výměníku tepla je potřebné nalézt řešení soustavy rovnic, které popisují proudění teplotního média a přenos tepla uvnitř tohoto média v prostoru a v čase. Fyzikální děje ve výměníku tepla lze popsat s použitím Fourierovy-Kirchhoffovy rovnice a Navierovy-Stokesovy rovnice.

Fourierova-Kirchhoffova rovnice pro výměník tepla má tvar

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = Q(x, y, z) + \rho C_p \left( v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

kde

- $C_p$  je měrná tepelná kapacita látky při konstantním tlaku,
- $Q$  reprezentace vnitřních zdrojů:  $Q(x, y, z) = 0$ ,
- $T$  reprezentace teplotního pole (skalárního),
- $k$  tepelná vodivost látky (obecně tenzor, jinak u homogenních látek skalár),
- $v$  reprezentace rychlostního (vektorového) pole,
- $t$  čas,
- $x, y, z$  prostorové souřadnice,
- $\rho$  hustota látky (např. teplotnosné médium nebo materiál stěny výměníku).

Předpokládá se, že vnější plášť výměníku je ideálně izolovaný od okolí, takže platí skalární vztah

$$\mathbf{n}^0 \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} + k_y \frac{\partial T}{\partial y} + k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

kde  $\mathbf{n}^0$  je jednotkový normálový vektor.

Stěna výměníku oddělující primární okruh (médium 1) od sekun-

dárního okruhu (médium 2) vyhovuje podmínkám kontinuity vedení tepla. Tato podmínka odpovídá rovnici

$$\mathbf{n}_1^0 \left( k_x \frac{\partial T_1}{\partial x} + k_y \frac{\partial T_1}{\partial y} + k_z \frac{\partial T_1}{\partial z} \right) - \mathbf{n}_2^0 \left( k_x \frac{\partial T_2}{\partial x} + k_y \frac{\partial T_2}{\partial y} + k_z \frac{\partial T_2}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

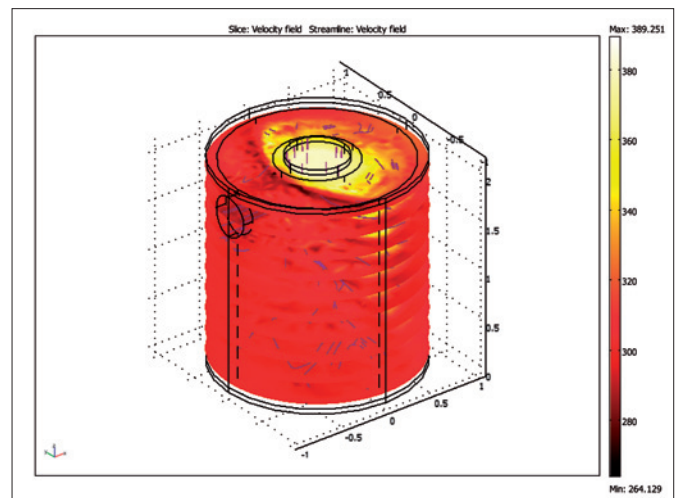
Okrajové podmínky na vstupu primárního a sekundárního média jsou

$$\begin{aligned} T(t, x, y, z) &= T_{11}, T_{11} = 380 \text{ K} \\ T(t, x, y, z) &= T_{12}, T_{12} = 290 \text{ K} \end{aligned} \quad (4)$$

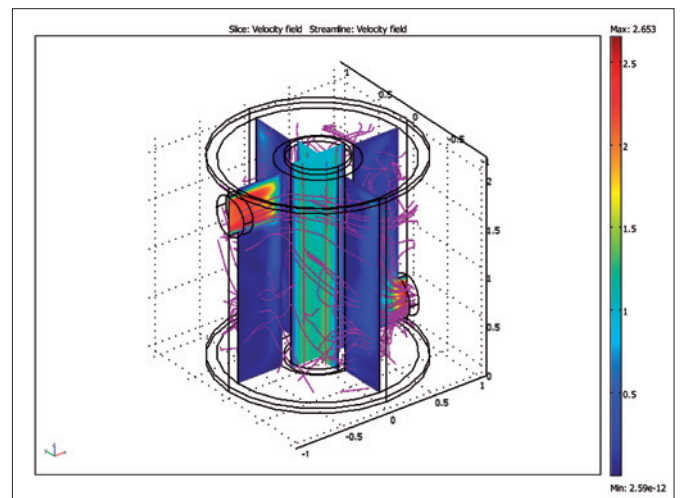
Okrajové podmínky na výstupu primárního a sekundárního média odpovídají okamžité hodnotě tepelného toku v daném místě, což odpovídá rovnici

$$-\mathbf{n}^0 \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} + k_y \frac{\partial T}{\partial y} + k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (5)$$

Při přenosu tepla mezi primárním a sekundárním médiem v tepelném výměníku se dominantně uplatňuje nucená konvekce. K Fourierově-Kirchhoffově rovnici (1) je tudíž nutné připojit rovnici spojitosti a rovnice popisující proudění teplotnosného média. V případě proudových polí s malými rychlostmi proudění je s ohledem na ka-



Obr. 3. Rozložení teplot podle fyzikálního modelu (Comsol Multiphysics)



Obr. 4. Rozložení rychlosti podle fyzikálního modelu (Comsol Multiphysics)

pacitu paměti výpočetních prostředků přípustným kompromisem použít Navierovu-Stokesovu rovnici

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho \left( v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = \mathbf{F}(x, y, z) \quad (6)$$

kde

$\mathbf{v}$  je vektor rychlosti pohybu teplotního média ve výměníku,

$v_x, v_y, v_z$  složky vektoru rychlosti  $\mathbf{v}$ ,

$\mathbf{F}(x, y, z)$  síla působící na jednotku objemu tekutiny ( $\mathbf{F} = 0$ ).

Průběh vektoru rychlosti teplotního média je počítán při zachování podmínky kontinuity

$$\rho \operatorname{grad} \mathbf{v} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

Předpokládá se, že vnější plášť i primární a sekundární potrubí výměníku jsou dokonale těsné a že teplotní médium nikde neuniká, tj. jeho hmotnostní tok mezi primárním a sekundárním okruhem je konstantní a rovný nule. Z toho plyne okrajová podmínka, podle které rychlost pohybu média v této části výměníku je rovna nule, tedy

$$\mathbf{v}(x, y, z) = 0 \quad (8)$$

Okrajové podmínky na vstupu primárního a sekundárního média jsou určeny konstantními rychlostmi proudění tekutiny

$$\begin{aligned} \mathbf{v}(t, x, y, z) &= v_{11}, v_{11} = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \\ \mathbf{v}(t, x, y, z) &= v_{12}, v_{12} = 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \end{aligned} \quad (9)$$

Okrajové podmínky na výstupu primárního a sekundárního média odpovídají podmínkám při konstantním tlaku  $p$  média při nulovém viskózním napětí, tedy platí

$$\begin{aligned} p(t, x, y, z) &= p_{21}, p_{21} = 2,1 \text{ MPa} \\ p(t, x, y, z) &= p_{22}, p_{22} = 1 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (10)$$

Řešení soustavy rovnic (1) a (6) při specifikovaných okrajových podmínkách (4) až (5) a (7) až (9) pro rozložení teploty v čase a prostoru pro výměník podle obr. 1 a tab. 1 je znázorněno na obr. 3. Rozložení rychlostního pole ukazuje obr. 4.

### Simulační model výměníku tepla

Simulační model je založen na řešení matematického modelu v podobě stavové maticové lineární diferenciální rovnice ve tvaru

$$\frac{ds}{dt} = \mathbf{A}(r)s(t) + \mathbf{B}(r)u_r(t) \quad (11)$$

kde

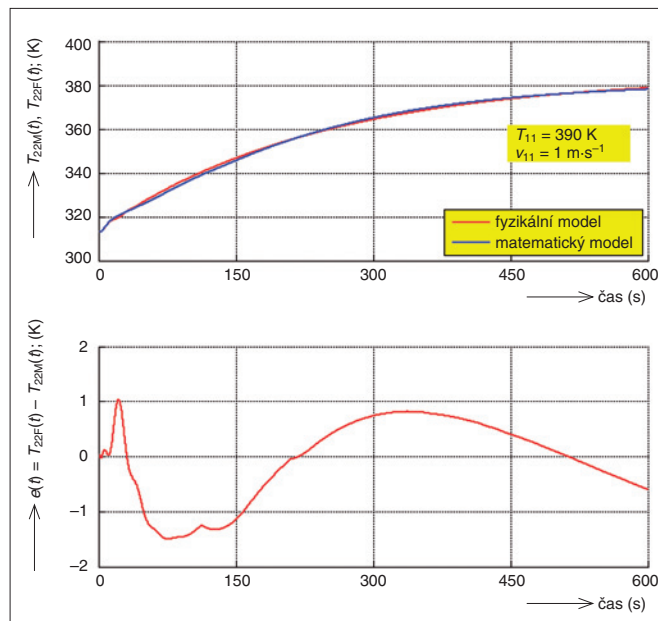
$s(t)$  je stavový vektor matematického modelu,

$u_r(t)$  vstupní veličina v podobě teploty na vstupu sekundárního okruhu,  $r$  pracovní bod daný teplotou v primárním okruhu výměníku.

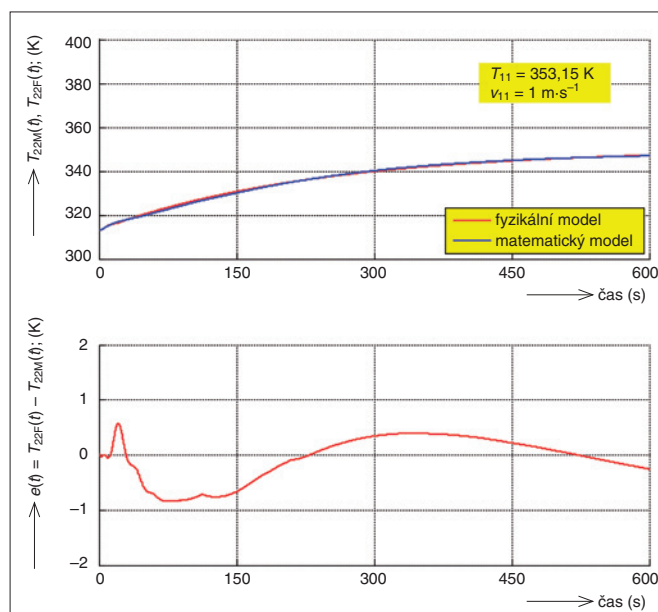
Pro výstupní veličinu matematického modelu, kterou je teplota média na výstupu sekundárního okruhu  $y_T(t)$ , platí

$$y_T(t) = \mathbf{C}(r)s(t) \quad (12)$$

Matice  $\mathbf{A}(r)$ ,  $\mathbf{B}(r)$  a  $\mathbf{C}(r)$  jsou závislé na parametru, který je určen pracovním bodem výměníku tepla. Pracovní bod výměníku je určen rychlostí toku  $\mathbf{v}(t)$  a teplotou  $T(t)$  média v primárním okruhu. Matice matematického modelu (11) byly identifikovány s fyzikálním modelem, jehož pohyb byl vypočítán na základě řešení soustavy parciálních diferenciálních rovnic (1) a (6) s uvážením příslušných počátečních a okrajových podmínek (viz výše). Identifikace matematického modelu byla prováděna na dané množině pracovních bodů výměníku tepla. Výsledky identifikace jsou ukázány na obr. 5 a obr. 6, kde jsou zobrazeny průběhy výstupních teplot média ze sekundárního okruhu fyzikálního a matematického modelu a průběhy chyb identifikace v podmínkách hraničních pracovních



Obr. 5. Časový průběh teploty na výstupu sekundárního okruhu fyzikálního  $T_{22F}(t)$  a matematického modelu  $T_{22M}(t)$  a absolutní chyby identifikace  $e(t)$  při pracovním bodu  $T_{11} = 390 \text{ K}$ ,  $v_{11} = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$



Obr. 6. Časový průběh teploty na výstupu sekundárního okruhu fyzikálního  $T_{22F}(t)$  a matematického modelu  $T_{22M}(t)$  a absolutní chyby identifikace  $e(t)$  při pracovním bodu  $T_{11} = 353,15 \text{ K}$ ,  $v_{11} = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

bodů, kdy rychlost proudění média v primárním okruhu je  $v_{11}(t) = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a teplota média v primárním okruhu je  $T_{11}(t) = 353,15 \text{ K}$ , popř.  $390 \text{ K}$ .

Matice matematického modelu určeného rovnicemi (11) a (12) pro pracovní bod  $r_1$  odpovídající hodnotám fyzikálních veličin primárního okruhu  $T_{11} = 390 \text{ K}$ ,  $v_{11} = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  mají podobu

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(r_1) &= \begin{bmatrix} -4,366 \cdot 10^{-3} & -1,790 \cdot 10^{-3} & -1,275 \cdot 10^{-5} \\ +4,154 \cdot 10^{-2} & -7,466 \cdot 10^{-2} & -3,894 \cdot 10^{-1} \\ +3,051 \cdot 10^{-2} & -2,549 \cdot 10^{-1} & -5,130 \cdot 10^{-2} \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}(r_1) &= \begin{bmatrix} +2,895 \cdot 10^{-6} \\ -1,559 \cdot 10^{-4} \\ +9,367 \cdot 10^{-5} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

$$C(r_1) = [+1,404 \cdot 10^3 \quad -1,251 \cdot 10^{-1} \quad +2,333 \cdot 10^{-3}]$$

$$D(r_1) = [0]$$

Obdobně jsou matice pro pracovní bod  $r_2$  odpovídající hodnotám fyzikálních veličin primárního okruhu  $T_{11} = 353,15 \text{ K}$ ,  $v_{11} = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , které pro omezený rozsah článku již nejsou uvedeny.

### Závěr

Funkce výměníku tepla je založena na pohybu tekutiny, který má nelineární charakter. Pro vypracování návrhu algoritmu řízení, popř. identifikace stavu výměníku tepla je potřebné navrhnout model popisující dynamické vlastnosti výměníku. Většina algoritmů řízení, popř. identifikace algoritmů využitelných v praxi je založena na lineární teorii řízení, popř. identifikace. Je proto vhodné nalézt takový model, který bude lineární v určité oblasti blízko pracovního bodu. Pohyb nelineárního fyzikálního modelu tak může být aproximován

matematickým modelem, jehož vlastnosti jsou závislé na volbě parametru. Parametr matematického modelu je určen pracovním bodem fyzikálního modelu výměníku tepla. Předpokladem takové aproximace je verifikovaný fyzikální model představený v článku.

### Poděkování

V článku jsou uvedeny výsledky získané v rámci řešení projektu MŠMT ČR Národního programu výzkumu II s názvem *Informační technologie pro znalostní společnost (2C)*, evid. č. 2C06007.

### Literatura:

- [1] BROGAN, W. L.: *Modern Control Theory*. Prentice Hall Inc., 1991.
- [2] REDDY, J. N. – GARTLING, D. K.: *The Finite Element Method in Heat Transfer and Fluid Dynamics*. CRC Press, 2000.
- [3] HUEBNER, K. H. – DEWHIRST, D. L. – SMITH, D. E. – BYROM, T. G.: *The Finite Element Method for Engineers*. John Wiley & Sons Inc., 2001.

Ing. Jiří Marek, CSc.,  
Unis a. s.

## ► Bezdrátové přístroje Yokogawa

Firma Yokogawa Electric Corporation představila letos v červnu přístroje s bezdrátovým přenosem využívající jako první na světě standard ISA100.11a. Zákazníkům byly první přístroje dodány v červenci. Uvedeny byly integrovaná bezdrátová brána a bezdrátové převodníky tlaku a rozdílu tlaků řady EJX-B a převodníky vysílače teploty řady YTA (na obrázku od leva). Přístroje mají veškeré přednosti vlastní standardu ISA 100.11 a zejména velkou spolehlivost a informační bezpečnost, širokou použitelnost ke sledování, diagnostice i řízení, provozní pružnost a vysokou míru kompatibility s existujícími kabelovými systémy.



Bezdrátové přístroje firmy Yokogawa jsou konstruovány k použití v prostředí s nebezpečím výbuchu. Zdrojem energie jsou standardní monočlánky rozměru LR20 v pouzdru umožňujícím jejich výměnu kdekoli v provozu. Přípravováno je napájení s použitím solárního panelu nevyžadujícího údržbu. Při vývoji bezdrátových přístrojů bylo striktně dbáno na jejich kompatibilitu s již dodávanými zařízeními, aby zákazník nebyl nucen investovat do propojení se stávajícími přístroji, a byly tak ochráněny dosavadní investice.

Bezdrátové přístroje se uplatní v různých oborech průmyslové automatizace, které spojuje společný jmenovatel – obtížně proveditelná nebo drahá kabeláž. Zkušenosti z praxe s nyní dodávanými přístroji budou využity k realizaci bezdrátových variant dalších provozních přístrojů ze široké nabídky firmy Yokogawa.

Yokogawa GesmbH, CEE, tel.: 222 863 444, fax: 222 863 448, e-mail: pavel.novak@at.yokogawa.com, www.yokogawa.com/fbs

## ► Nová generace elektrických pohonů pro systémy HVAC

Nová generace elektrických zdvihových pohonů řady Acvatix pro soustavy vytápění, větrání a klimatizace (HVAC) navazuje na dosavadní osvědčený sortiment pohonů, který byl zcela přepracován a také rozšířen. Přístroje se vyznačují přesnou regulační funkcí, velkou spolehlivostí, snadnou montáží a pokrytím všech typů úloh v soustavách HVAC.

Pohony řady Acvatix nové generace jsou technicky dokonalejší a vstřícné k požadavkům projektantů a montážních firem – např. všechny nové pohony typu Acvatix SAX se instalují, ovládají i udržují stejným způsobem. Kolo ručního ovládní umožňuje bez použití nářadí manipulovat s vřetenem ventilu ve všech montážních polohách pohonu, což je užitečné během servisních prací nebo v nouzových situacích. Indikace polohy vřetene je současně viditelná z různých stran a vestavěná světelná dioda umožňuje zjistit provozní stav pohonu na dálku. Energetická účinnost pohonů významně vzrostla zavedením nových bezkartáčových stejnosměrných motorů. Novinkou je i jednoduchý způsob připojení pohonu k ventilu vylučující chybnou montáž.



Pohony nové generace jsou zpětně kompatibilní se všemi ventily Acvatix vyrobenými v posledních 30 letech. Při modernizaci soustav HVAC lze tudíž pohon nové řady Acvatix připojit k libovolnému existujícímu ventilu značky Siemens s velkým zdvihem. Další informace o produktech řady Acvatix jsou na [www.siemens.cz/ventily](http://www.siemens.cz/ventily). Siemens, s. r. o., tel.: 233 033 303, [www.siemens.cz/buildingtechnology](http://www.siemens.cz/buildingtechnology), e-mail: [siemens.cz@siemens.com](mailto:siemens.cz@siemens.com)