

Aplikace simulačních metod pro zjištění tepelného chování systémů v budovách - 1. část

Gerlich Vladimír · Elektrotechnika, Informačné technológie, MATLAB/Comsol

11.07.2011



V posledních letech se značné množství vědeckých publikací zabývá různými přístupy ke snižování spotřeby energie v budovách. Téma této práce spadá do stejné problematiky a jejím účelem je prozkoumání možností v současné době používaných dynamických výpočtů přenosu tepla v budovách. Tyto výpočty jsou často určeny státními normami a pouze v některých případech se počítá s dynamickým užíváním budovy.

Základním cílem práce je simulování tepelné odezvy konstrukce budovy s proměnnými okrajovými podmínkami s jejím následným porovnáním se zjednodušenými metodami používanými v normách. Protože v současné době existuje množství již vypracovaných zjednodušených metod, tak by se tato práce měla zabývat jejich vzájemným porovnáním s následným srovnáním pomocí vytvořeného numerického modelu nezjednodušeného problému.

Z tohoto důvodu byl vytvořen model části budovy v nástroji pro numerického modelování COMSOL Multiphysics. Na takto vytvořeném modelu byly nastaveny nutné parametry, jakými jsou fyzikální vlastnosti jednotlivých prvků nebo okrajové a simulační podmínky modelu. Následně byl takto vytvořený model srovnán s reálně naměřenými daty.

1. Úvod do problematiky

V současné době patří mezi hlavní parametry prostředí budov tepelný komfort a úspora energií, a proto je třeba zkoumat spotřebu budov případně návrh budov nových jak s ohledem na spokojenost jejich uživatelů, tak s minimálním využitím energie pro její vytápění a chlazení. Téma této publikace bylo proto navrženo se záměrem prozkoumání problémů tepelně dynamických parametrů budovy ve vztahu k energetické zátěži vytápění/větrání a za účelem simulace vnitřního prostředí v budovách (zejména teploty).

1.1 Tepelné pochody v budovách

Výsledný stav vnitřního prostředí budov ovlivňuje velké množství parametrů, mezi které lze na jedné straně zařadit parametry konstrukce (tepelný prostup zdmi a okny, infiltrace vzduchu atd.) a na druhé straně atmosférické podmínky (vnější teplota, tepelné zisky ze slunce, rychlost větru, relativní vlhkost atd.). Kombinace všech těchto

parametrů určuje tepelnou výměnu mezi vnitřním a vnějším prostředím, a tak často velmi výrazně ovlivňuje jak výslednou vnitřní teplotu v budově/místnosti, tak ve svém důsledku i spotřebu energie.

V současné době je nejpoužívanějším typem výpočtů v prostředí vnitřního klimatu budov výpočet ustáleného stavu. Tyto výpočty jsou popsány státními normami [1]-[6] a pouze v několika případech [7]-[9] se počítá s dynamickým užíváním budovy (obvykle s hodinovým krokem). Tato skutečnost je převážně způsobena manuálním přístupem k výpočtu potřebných vytápěcích výkonů, což při současném výkonu výpočetních techniky a schopnosti softwarových nástrojů již, na rozdíl od minulých desetiletí, není nezbytné.

Na druhou stranu je potřeba podotknout, že ne-používání většího počtu komerčních simulačních nástrojů v technické praxi je způsobeno také jejich cenou, která by byla v konečném důsledku přenesena na zákazníky, a tak by v silném konkurenčním prostředí mohla znamenat pro danou společnost výrazný problém se schopností prodat své řešení, přestože by použité výstupy více odpovídaly reálným podmínkám užívání budovy.

1.2 Dynamické tepelné simulace

Dynamickými simulacemi se rozumí výpočet chování budovy v okamžicích, kdy ještě nebylo dosaženo rovnovážného stavu. Obecněji lze říci, že se jedná o děje, kde se v průběhu času mění hodnota počítané veličiny (při výpočtu vnitřního prostředí budov zejména teploty a relativní vlhkosti). Při manuálních výpočtech jsou vstupní parametry obvykle konstantní, ale obecně mohou být časově resp. teplotně proměnné. Mezi tyto parametry lze zařadit hodnoty průběhu počasí, fyzikálně-technické parametry stěn, systém úpravy vnitřního klimatu nebo způsob užívání budovy.

Oproti stávajícím výpočtům umožňují dynamické simulace zejména přesněji analyzovat vazby a průběhy parametrů v rámci budovy jako celku. Obecně lze říci, že z více informací, které lze do dynamických výpočtů zahrnout, lze učinit efektivnější rozhodnutí pro budoucí úsporná opatření budovy. Práce zabývající se dynamickým chováním budov a jejich částí využívající jednoúčelové softwarové nástroje pro tepelné simulace, až po univerzální simulační balíky jsou popsány v [10]-[13].

1.3 Přenos tepla

Rovnice uvedené v této kapitole popisují základní fyzikální vztahy zabývající se přenosem tepla a jejich znalost je nezbytná pro pochopení výpočtů přenosu tepla. Detailnější informace o této problematice lze nalézt v [14]-[17]. Základním principem přenosu tepla je existence teplotního gradientu – rozdíl teplot v různých bodech dané oblasti – přičemž k přenosu tepla dochází vždy z látky o vyšší teplotě do látky s nižší teplotou. Obecně rozlišujeme 3 základní druhy šíření tepla:

- Vedení (kondukcce).
- Proudění (konvekce).
- Tepelné záření (sálání, radiace).

1.3.1 Vedení tepla

Sdílení tepla vedením je založeno na mikroskopickém kmitání jednotlivých částic látky, které se ale sami makroskopicky nepřemísťují. Kondukce je nejčastější způsob šíření tepla v pevných tělesech, ale částečně probíhá i v kapalinách. Tento jev je oproti ostatním způsobům šíření tepla značně pomalý.

Přenos tepla je popsán Fourierovým zákonem, a jeho řešení je tak založeno na následující diferenciální rovnici:

$$q = -\lambda \text{grad}T = -\lambda \Delta T \quad (1)$$

Vedení tepla lze dále rozdělit na dva základní druhy. První se zabývá popisem přenosu tepla v ustáleném stavu a označuje se pojmem stacionární sdílení tepla, druhý se nazývá nestacionární sdílení tepla a popisuje tepelné děje před jejich ustálením. Z popisu je patrné, že nestacionární děj je složitější, protože je třeba řešit nejen prostorovou, ale i časovou závislost děje.

Aby bylo možné jednoznačně řešit konkrétní případy vedení tepla, je nutno diferenciální rovnici (1) doplnit okrajovými a počátečními podmínkami. Pro sdílení tepla rozlišujeme 4 základní okrajové podmínky:

- Okrajová podmínka prvního druhu (popisuje rozložení teploty na povrchu tělesa pro každý časový okamžik)

$$T_p = f(x, y, z, t) \quad (2)$$

- Okrajová podmínka druhého druhu (popisuje rozložení plošné hustoty tepelného toku na povrchu tělesa pro každý časový okamžik)

$$q_p = f(x, y, z, t) \quad (3)$$

- Okrajová podmínka třetího druhu (určuje přestup tepla mezi tekutinou a tělesem, tato podmínka je popsána Newtonovým zákonem)

$$q = h(T_p - T_T) \quad (4)$$

- Okrajová podmínka čtvrtého druhu (popisuje přestup tepla při ideálním styku dvou těles)

$$\lambda_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial n} \right) = \lambda_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial n} \right) \quad (5)$$

1.3.1.1 Stacionární vedení tepla

Termínem stacionární neboli ustálené vedení tepla označujeme přenos tepla, který není závislý na časovém okamžiku, a je tak ve všech časových okamžicích stejný. Stacionární sdílení tepla je popsáno rovnicí (1), za předpokladu udržování konstantního rozdílu teplot bodů, mezi kterými se teplo přenáší.

1.3.1.2 Nestacionární vedení tepla

Na rozdíl od děje popsaného v předchozí kapitole se jedná o proces, který je časově závislý a vlastní matematický popis je tak podstatně složitější. Je zapotřebí řešit PDR s příslušnými okrajovými a počátečními podmínkami. Nástin odvození průběhu teploty při uvažování nestacionárního vedení tepla bude pro vybrané okrajové podmínky

představeno níže.

1.3.2 Proudění tepla

Využívá makroskopický pohyb daného prostředí, a uplatňuje se tak u kapalin a plynů. Proudění tepla bez změny skupenství se dělí to dvě hlavní skupiny:

- Přirozené proudění (volná konvekce).
- Nucené proudění (nucená konvekce).

U přirozeného proudění dochází k pohybu částic pouze v důsledku rozdílné hustoty kapaliny zapříčiněné teplotním gradientem, zatímco u nucené konvekce je tekutina k pohybu uměle nucena (např. čerpadlem nebo ventilátorem).

1.3.2.1 Přirozené proudění

Volná neboli přirozená konvekce nastává vlivem rozdílné teploty kapaliny v jejím objemu, jež způsobuje její prostorově rozdílnou hustotu a jejímž důsledkem je pohyb tekutiny vlivem působení gravitační síly.

Přenos tepla přirozeným prouděním je obecně menší než při nucené konvekci a je závislý na Grashofově (Gr)¹ a Prandlově (Pr)² kritériu, jejichž hodnota ovlivňuje hodnotu Nusseltova (Nu)³ kritéria (vztahy pro různé situace volné konvekce lze nalézt v [14]). Matematická vazba mezi Nusseltovým kritériem a Součinitelem Přestupu Tepla (SPT) je určen rovnicí

$$Nu = \frac{h \cdot l}{\lambda} \quad (6)$$

1.3.2.2 Nucené proudění

U nuceného proudění neboli nucené konvekce je hmota látky „přinucena“ k pohybu vnějším mechanismem. Vlastní přenos tepla je oproti volné konvekci zpravidla významnější z důvodu větší intenzity proudění. Přenos tepla je u nucené konvekce závislý na Reynoldsově (Re)³ a Prandlově (Pr)² kritériu, které ovlivňují hodnotu Nusseltova (Nu)³ kritéria (vztahy pro různé situace nuceného proudění lze nalézt v [14]). Matematická vztah mezi Nusseltovým kritériem a SPT je opět popsán rovnicí (6).

1.3.3 Tepelné záření

Je přenos tepla pomocí elektromagnetického vlnění. Množství tepla přenesené sáláním neboli radiací neboli tepelným zářením mezi 2 rovnoběžnými tělesy stejné plochy je popsáno rovnicí

$$Q = \frac{1}{1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1} A \sigma [T_1^4 - T_2^4] \quad (6)$$

Z výše uvedené rovnice je díky čtvrtým mocninám patrné, že pro přenos tepla sáláním je nejvíce významnou veličinou teplota, resp. rozdíl teplot mezi plochami, mezi kterými k sálání odchází. Při malých teplotních rozdílech má sálání pouze minoritní vliv a přenos tepla se tam uskutečňuje hlavně kondukcí a konvekcí.

1.3.4 Složené sdílení tepla

Jednotlivé způsoby šíření tepla byly sice představeny v předchozích kapitolách jako samostatné děje, ale při reálných aplikacích dochází k jejich kombinacím. Nejčastější kombinací je sériová kombinace přestup-vedení-přestup známá pod pojmem prostup tepla, která se uplatňuje např. při průchodu tepla zdí z vnitřního do vnějšího prostředí. Kromě této sériové kombinace se tyto děje odehrávají také paralelně, kde vliv jednotlivých složek přenosu tepla určují specifické podmínky dané situace (rychlost proudění, teplota látky).

Poděkování

Práce na této publikaci byla podpořena Evropským Fondem pro Regionální Rozvoj při projektu CEBIA-Tech No. CZ.1.05/2.1.00/03.0089 a dále interní grantovou agenturou Univerzity Tomáši Bati ve Zlíně s číslem IGA/44/FAI/10/D.

Použitá literatura a zdroje

1. ČSN EN ISO 13792. Tepelné chování budov : Výpočet vnitřních teplot v místnosti v letním období bez strojního chlazení – Zjednodušené metody. [s.l.] : Český normalizační institut, 2005. 49 s.
2. ČSN 73 0540-1. Tepelná ochrana budov – Část 1: Terminologie. Praha : [s.n.], 2005. 68 s.
3. ČSN 73 0540-2. Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky. Praha : [s.n.], 2007. 44 s.
4. ČSN 73 0540-3. Tepelná ochrana budov – Část 3: Návrhové hodnoty veličin. Praha : [s.n.], 2005. 96 s.
5. ČSN 73 0540-4. Tepelná ochrana budov – Část 4: Výpočtové metody. Praha : [s.n.], 2005. 60 s.
6. ČSN EN 12831. Tepelné soustavy v budovách : Výpočet tepelného výkonu. [s.l.] : Český normalizační institut, 2005. 73 s.
7. ČSN 06 0220. Tepelné soustavy v budovách – Dynamické stavy. Praha : [s.n.], 2006. 20 s.
8. ČSN EN ISO 13790. Energetická náročnost budov – Výpočet spotřeby energie na vytápění a chlazení. Praha : [s.n.], 2006. 140 s.
9. ŘEHÁNEK, Jaroslav. Tepelná akumulace budov. 1. vydání. Praha : Informační centrum České komory autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě, 2002. 280 s. ISBN 80-86364-59-3.
10. SCHELLEN, H.L.; SCHIJNDEL, A. W. M. van; BRIGGEN, P. M. The use of COMSOL for Building Constructions Engineering regarding Heat and Moisture Transport. In Proceedings of the COMSOL Conference 2008 Hannover. [s.l.] : [s.n.], 2008. s.
11. VOGEL, Petr, et al. Rozdělení spotřeby tepla na vytápění na příkladu panelového domu. TZB-info – stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov [online]. 22.11.2010, [cit. 2011-02-15]. Dostupný z WWW: <
<
http://stavba.tzb-info.cz/regenerace-bytovych-domu/6952-rozdeleni-spotreby-tepla-na-vytapeni-na-prikladu-paneloveho-domu#english_synopsis>. ISSN 1801-4399.
12. SCHIJNDEL, Jos van. Integrated Modeling using MatLab, Simulink and COMSOL: with heat, air and moisture applications for building physics and systems. 2008. Saarbrücken: VDM Verlag Dr. Muller Aktiengesellschaft & Co. KG., 197 p. ISBN 978--

- 639-10669-5.
13. SCHIJNDEL, A.W.M. van, et al. Application of an integrated indoor climate, HVAC and showcase. *Energy and Buildings*. 2008, 40, s. 647–653. [článek]
 14. ÇENGEL, Yunus A. *Heat and mass transfer : a practical approach*. Boston : McGraw-Hill, 2007. 901 s. ISBN 0073129305.
 15. LIENHARD IV, John H.; LIENHARD V, John H. *A heat transfer textbook*. 4th edition. Cambridge : Phlogiston Press, 2003. 749 s.
 16. KOLOMAZNÍK, Karel; SEDLÁŘ, Jaroslav; MACHÁČKOVÁ, Alena. *Teorie technologických procesů III. první*. Brno : Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1978. 139 s. ISBN 55-588-78.
 17. HEJZLAR, Radko. *Sdílení tepla. 3*. Praha : ČVUT, 1999. 186 s. ISBN 80-01-01982-9.
 18. VITÁSEK, Emil. *Numerické metody*. Praha : SNTL, 1987. 516 s. ISBN 04-009-87.
 19. Multiphysics Modeling and Simulation Software - COMSOL [online]. 2011 [cit. 2011-06-14]. Multiphysics Modeling and Simulation Software. Dostupné z WWW: <<http://www.comsol.com/>>.
 20. ŠIŠÁK, Jiří. *Počítačová simulace a modelování výseku objektu pomocí programu FEMLAB*. [s.l.], 2006. 97 s. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Zálešák, CSc.
 21. MINISTR, Jakub. *Optimalizace elektrického ohřevu výměn*. Zlín, 2008. 62 s. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky.
 22. ESP-r [online]. 2011 [cit. 2011-02-28]. ESP-r. Dostupné z WWW: <<http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm>>.
 23. BABICA, Vladimír. *Ověření simulační metody ESP-r v rámci laboratoře Inteligentní budovy* [online]. [s.l.], 2007. 109 s. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Zálešák, CSc.
 24. TRNSYS Information [online]. 2011 [cit. 2011-02-28]. The Transient Energy System Simulation Tool. Dostupné z WWW: <www.trnsys.com>.
 25. GERLICH, Vladimír. *Validation Heat Transfer Model by Experimental Measurement*. In *Proceedings of 12th International Carpathian Control Conference*. [s.l.] : [s.n.], 2011. ISBN 978-1-61284-359-9.
 26. GERLICH, Vladimír. *Modelling of Heat Transfer in Buildings*. In *Proceedings of 25th European Conference on Modelling and Simulation ECMS 2011*. [s.l.] : [s.n.], 2011. s. 244. ISBN 978-0-9564944-2-9.
 27. BEASOLEIL-MORRISON, Ian. *Flow responsive modelling of internal surface convection*. In *Building Simulation : Seventh International IBPSA Conference*. Rio de Janeiro : [s.n.], 2001. s. 923-930.
 28. BEASOLEIL-MORRISON, Ian. *The adaptive simulation of convective heat transfer at internal building surfaces*. *Building and Environment*. 2002, 37, s. 791 – 806. ISSN 0360-1323.
 29. IRVING, S. J. *Energy program validation: conclusions of IEA Annex I. Computer-aided design*. 1982, 14, s. 33-38.
 30. WALLENTÉN, P. *Convective heat transfer coefficients in a full-scale room with and without furniture*. *Building and Environment*. 2001, 36, s. 743–751. ISSN 0360-1323.
 31. KHALIFA, Abdul-Jabbar N. *Natural convective heat transfer coefficient - a review I. Isolated vertical and horizontal surfaces*. *Energy Conversion and Management*. 2001, 42, s. 491-504. ISSN 0196-8904.
 32. KHALIFA, Abdul-Jabbar N. *Natural convective heat transfer coefficient - a review II. Surfaces in two- and three-dimensional enclosures*. *Energy Conversion and*

Management. 2001, 42, s. 505-517. ISSN 0196-8904.

33. J.M. Coulson and J.F. Richardson. Chemical Engineering. vol. 1. 4th edition. Pergamon Press. 1990.

$${}^1Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_S - T_L) \cdot l^3}{v^2}$$

$${}^2Pr = \frac{c_p \cdot \eta}{\lambda}$$

$${}^3Re = \frac{v \cdot l}{\nu}$$

Použité symboly

Bi	[-]	Biotovo číslo $Bi = h \cdot d / \lambda$	Biot number
t	[s]	Čas	Time
l	[m]	Charakteristický rozměr	Characteristic length
Fo	[-]	Fourierovo číslo $Fo = a \cdot t / d^2$	Fourier number
Gr	[-]	Grashofovo číslo	Grashof number
g	[ms ⁻²]	Gravitační zrychlení	Standard gravity
q	[Wm ⁻²]	Hustota tepelného toku	Heat flux
Nu	[-]	Nusseltovo číslo	Nusselt number
x	[m]	Pozice	Position
Pr	[-]	Prandtlovo číslo	Prandtl number
Re	[-]	Reynoldsovo číslo	Reynolds number
v	[ms ⁻²]	Rychlost	Speed
h	[Wm ⁻² K ⁻¹]	Součinitel přestupu tepla	Heat transfer coefficient
c _p	[J.kg ⁻¹ K ⁻¹]	Tepelná kapacita	Heat capacity
Q	[W]	Tepelný zdroj	Heat source
ΔT	[Km ⁻¹]	Teplotní gradient; rozdíl teplot dvou bodů vydělený jejich vzdáleností	Temperature gradient; temperature difference divided by thickness
a	[m ² s]	Teplotní vodivost $a = \lambda / \rho c_p$	Thermal diffusivity
d	[m]	Tloušťka	Thickness

Řecké symboly

ε	[-]	Emisivita	Emissivity
ρ	[kg.m ⁻³]	Hustota	Density
ν	[m ² s ⁻¹]	Kinematická viskozita	Kinematic viscosity
μ	[-]	Kořen	Root
β	[K ⁻¹]	Součinitel objemové roztažnosti	Volumetric thermal expansion coefficient
λ	[W.m ⁻¹ K ⁻¹]	Tepelná vodivost	Thermal conductivity
θ	[°C]	Teplota	Temperature

Indexy

e	Vnější	External
p	Počáteční	Initial
S	Povrch	Surface
L	Tekutina	Liquid
si	Vnitřní povrch	Internal surface
