Portál pre odborné publikovanie ISSN 1338-0087

Aplikace simulačních metod pro zjištění tepelného chování systémů v budovách – 3. část

Gerlich Vladimír · Elektrotechnika, MATLAB/Comsol

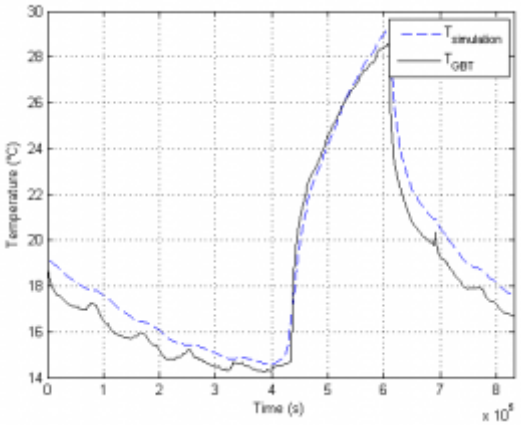
25.07.2011

Tato poslední část příspěvku se bude zabývat ověřením přesnosti tvořeného modelu části budovy. Díky výraznému nárůstu výkonu počítačové techniky během uplynulých let, je možné každým rokem vytvářet přesnější numerické modely fyzikální dějů a technologických procesů. Je třeba si ale uvědomit, že numerické řešení nemusí vždy dávat správné výsledky, a tak v žádném případě není možno automaticky předpokládat, že numerické modely jsou lepší než jejich analytické protějšky. Při tvorbě modelu je tak třeba vždy nejprve zvážit jednotlivé možné zdroje chyb a důležitost jednotlivýchparametrů modelu.

2.4.6 Validace vytvořeného modelu

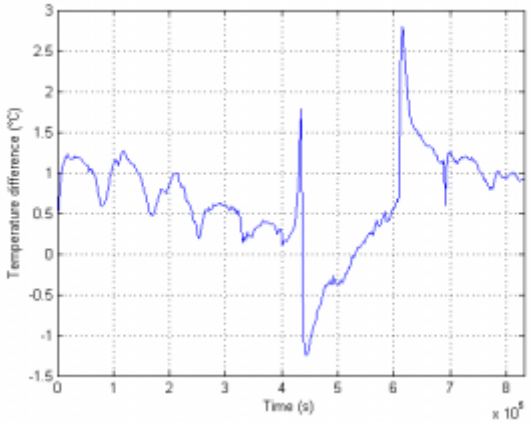
Pro nastavení fyzikálních parametrů vytvořeného modelu místnosti byly použity tabelované hodnoty použitých stavebních materiálů. Model byl postupně upravován a zpřesňován pomocí naměřených průběhů hodnot teploty během dvou experimentů v letech 2010 [25] a 2011 [26]. Během prvního experimentu trvajícího necelých 10 dní, který byl uskutečněn v únoru 2010, se nejprve nechala místnosti volně chladnout, ve druhé části pokusu byl zapnut zdroj tepla a v závěrečné části místnost opět volně vychládala.

Nejprve byla pro simulace použita geometrie místnosti představená v [19], která ale vykazovala významné odchylky od provedeného měření, a tak bylo do geometrie modelu zahrnuto více detailů konstrukce místnosti. Současný stav geometrie modelu byl zobrazen v obrázku 3. V první části průběhu teplot zobrazeného na obrázku 4 je patrný rozdíl mezi simulovaným a naměřeným průběhem teplot. Hladkost simulovaného průběhu teploty ukazuje na možný rozdíl v modelování akumulační schopnosti místnosti, z důvodu podstatně menšího ovlivnění výkyvy vnější teploty.



Obr. 4 – Průběh teploty místnosti při prvním experimentu

V části experimentu, kdy byla místnosti zahřívána je shoda mezi daty na dobré úrovni s velikostí odchylek okolo 0,3°C. Průběh odchylky teploty mezi experimentálně získanými daty a hodnotami získanými simulací jsou zobrazeny na obrázku 5. Po této fázi jsou ovšem simulované hodnoty teploty opět vyšší než bylo zjištěno z experimentu. Vypočtená průměrná hodnota odchylky mezi měřením a simulací je zhruba 0,79°C, což je pro simulace prostředí v budovách významná odchylka.



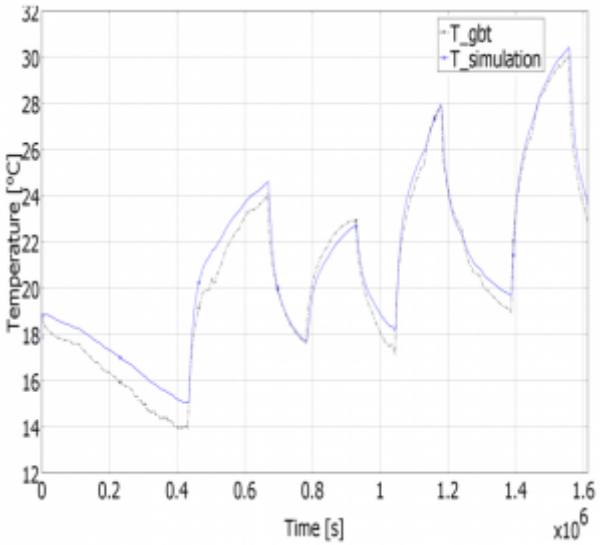
Obr. 5 – Průběh odchylky teplot při prvním experimentu

Důležitým poznatkem z toho měření bylo potvrzení předpokladu, že v modelu lze zanedbat prostup tepla z okolních místností (kromě tepla prostupující podlahou), a lze tak během následujících experimentů umístit více termočlánků do měřené místnosti namísto měření teplot okolních prostor, které pro výslednou teplotu v místnosti mají zanedbatelný vliv. I přes významný rozdíl mezi simulací a měřením bylo přistoupeno k druhému experimentu, který měl definitivně potvrdit nebo zamítnout zvolené simulační prostředí pro modelování nestacionárního sdílení tepla v budovách.

Během druhého experimentu, který se uskutečnil na přelomu prosince 2010 a ledna 2011, byl cyklus vyzkoušený během předchozího pokusu opakován 4x s celkovou dobou měření téměř 19 dní. Pro části experimentu, ve kterých byla místnost zahřívána, byly použity rozdílné výkony vnitřního zdroje tepla, aby se jednotlivé fáze ohřevu místnosti mírně odlišovaly.

Průběh teplot v laboratoři je zobrazen na obrázku 6. Je patrné, že zejména v částech experimentu, kdy dochází k volnému vychládání místnosti, jsou rozdíly mezi oběma

průběhy poměrně značné. Jak bylo zjištěno, k této situaci dochází z důvodu použití SPT na vnitřním povrchu vnější stěny s hodnotou 2,5 W/m^2.K. Tato hodnota byla vzata z norem [6] a způsoboval značný rozdíl mezi naměřenými simulovanými daty jak během druhého, tak i prvního měření.



Obr. 6 – Průběh teploty místnosti při druhém experimentu při výpočtu s konstantní hodnotou SPT

Při tvorbě modelu bylo nejprve počítáno s konstantní hodnotou SPT pro vnitřní povrchy, jehož obvyklou hodnotu pro podmínky běžné při užívání budov lze naleznout v evropských resp. českých normách [1]. Při pozdějším zkoumání simulačních výsledků bylo zjištěno, že tento parametr velmi významně ovlivňuje simulační výsledky, a tak byla provedena detailnější analýza nastalé situace.

V minulých letech byl vliv hodnoty SPT na celkovou tepelnou bilanci budovy zkoumán několika autory. V [27] a [28] je poukázáno, že modelování přenosu tepla je velmi citlivé na přesné určení SPT. Publikace upozorňují až na 45% nárůst hodnoty SPT, který je vypočten pro jednotlivé simulační kroky s ohledem na aktuální podmínky, oproti uvažování jeho konstantní hodnoty pro vnitřní prostředí v budovách. Tento rozdíl je více patrný v budovách, které mají menší hodnotu součinitele prostupu tepla (U-hodnotu).

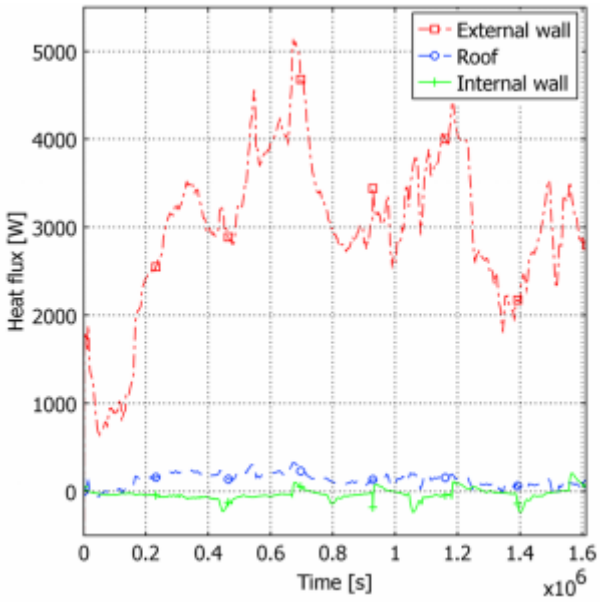
V publikaci [29] je upozorněno, že zatímco parametry, mezi které lze zařadit např. tepelnou vodivost, jsou relativně snadno zjistitelné, tak naopak proces konvekce je modelován s hodnotami parametrů, které mohou být zatíženy značnou nejistotou. Práce [30], zkoumající hodnotu místní hodnotu SPT, se zabývá vlivem klimatizace a polohou radiátoru na proudění vzduchu v místnosti se závěrem, že lokální hodnota SPT může nabývat až desetinásobku běžně očekávané hodnoty.

Publikace [31] a [32] upozorňují na problém se značně rozdílnými vztahy extrapolující hodnotu SPT z měření vykonaných za zjednodušených podmínek (tj. obdržených pouze z 1- případně 2-dimensionálních experimentů) a mezi experimenty komplexními (3-dimensionálními, modely jsou většinou zmenšené místnosti). Články poukazují na skutečnost, že obzvláště při přenosu tepla v budovách, je třeba brát zřetel zejména na komplexní modely popisující hodnoty SPT, které je nutné modelovat podle skutečného uspořádání zdroje tepla, umístění oken atd.

Protože je v programu, který byl použit pro tvorbu modelu je implementován výpočet SPT dle [33], tak lze očekávat, že korekce odchylek zmíněných v předchozích odstavcích nebudou implementovány, a bude tak třeba provést dodatečnou korekci vypočtených hodnot SPT dle uvedených publikací.

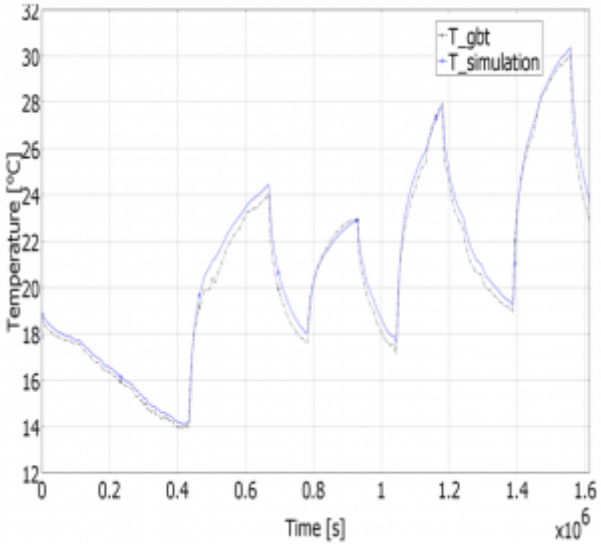
Opakovanými simulacemi bylo zjištěno, že pro obdržení dostatečně věrohodného výsledku simulace, není možno počítat s konstantní hodnotou SPT po celou dobu simulace, a proto bylo přistoupeno k výpočtu tohoto parametru v každém simulačním kroku. K této úpravě modelu bylo přistoupeno zejména s ohledem na průběh toku tepla zobrazeného na obrázku 7. Ztrátové teplo jdoucí přes vnější stěnu a okno je více než 22-násobné oproti toku tepla přes zbylé vnitřní povrchy. Z takto značně nerovnoměrně rozloženého toku tepla plyne vysoká potřeba přesnosti vypočtené hodnoty SPT na těchto površích.

Hlavním parametrem, který ovlivňuje SPT, je proměnný rozdíl teplot mezi povrchem stěny a teplotou vzduchu daný dynamickou povahou experimentu. Dalšími parametry, které způsobují odchylky přenosu tepla získaného simulací od skutečného stavu, mohou tvořit nehomogenity stěn a detaily místnosti jakými jsou rohy nebo kouty, ve kterých je skutečná hodnota SPT odlišná od hodnot vypočtených pro rovinné stěny pomocí obvyklých vztahů.



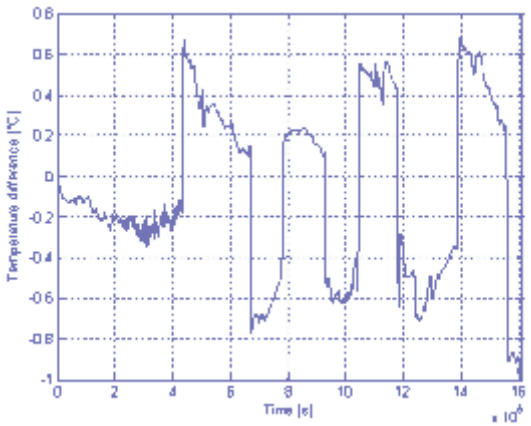
Obr. 7 – Průběh toku tepla

Na obrázku 8 je zobrazena simulace teploty místnosti, kde namísto hodnoty SPT doporučované v normách, byla tato hodnota počítána v každém simulačním kroku. Na první pohled je patrné citelné zmenšení chyby dané modelováním. Průběhy teplot si jsou výrazně podobnější, i když i v tomto průběhu lze spatřit odchylky mezi oběma řadami, zejména v závěrečné fázi vychládání místnosti.



Obr. 8 – Průběh teploty místnosti při druhém experimentu při výpočtu s proměnnou hodnotou SPT

Přesnější srovnání mezi oběma průběhy je zachyceno na vývoji odchylky simulačního výstupu od naměřených dat, který je zobrazen na obrázku 9. Maximální odchylka nastává v závěrečné fázi a má hodnotu blízkou 0,9°C. Důležitější informací ovšem je hodnota průměrné odchylky mezi oběma grafy, která se pohybuje těsně pod hodnotou 0,4°C. Porovnáním těchto hodnot s odchylkami z prvního měření je na první pohled zřetelný vliv hodnoty SPT. Po jeho dynamickém výpočtu v každém simulačním kroku dochází ke snížení rozdílu mezi simulací a měřením na přibližně poloviční hodnotu.



Obr. 9 – Průběh odchylky teplot při druhém experimentu

Při obou experimentech byly jako zdroje tepla použity přímotopy, u kterých byl měřen odběr el. energie a tato hodnota byla při simulacích použita pro hodnoty vnitřního zdroje tepla.

3. Závěr

Během dvou let byl vytvořen, postupně zpřesňován a nakonec i úspěšně validován numerický model místnosti založený na přenosu tepla v prostředí programu COMSOL Multiphysics. Bylo ověřeno, že na přesnost simulačních experimentů má vliv zejména hodnota součinitele přestupu tepla na vnitřním povrchu stěn budovy. Vznikající nejistoty jsou významné především na stěnách s nízkou hodnotou součinitele prostupu tepla. Kromě této odchylky, která je způsobena fyzikální podstatou děje je nutné

vyloučit chybu vzniklou modelováním. Zejména se jedná o potřebu tvorby dostatečně kvalitní sítě a nastavení dostačující přesnosti numerického řešitele výpočtu při tvorbě numerického modelu.

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. Saarbrucken: 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. BEAUSOLEIL-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 coeffcients 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.