

Oponentský posudek doktorské disertační práce

Jméno doktoranda : **Ing.Vladimír Gerlich**
Téma práce : **Ověření možnosti využití programu COMSOL Multiphysics jako prostředí pro simulace tepelného chování systémů s akumulací**
Školitel : prof.Ing.Vladimír Vašek, CSc.
Konzultant: Ing.Martin Zálešák, CSc.
Oponent: prof. Ing. Karel Kabele, CSc.
ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra TZB

1. Vyjádření k zadanému tématu

Hledání optimálních řešení staveb a jejich energetických systémů pro vytvoření optimální kvality vnitřního prostředí při minimální spotřebě energie je v současnosti jednou z priorit rozvoje vyspělých společností. Problematika využití matematického modelování a simulace energetického chování budov a jejich prvků je aktuální a rozvíjející se téma. V souvislosti se zvyšující se kapacitou výpočetní techniky se zvyšuje počet dostupných výpočetních programů a s tím souvisí kvalita a vhodnost jejich použití pro řešení daného problému. Téma předložené práce považuji za aktuální.

2. Posouzení splnění stanovených cílů

V práci bylo stanoveno 5 hlavních cílů, zaměřených na teoretický a analytický rozbor, porovnání výsledků programu COMSOL s analytickým a numerickým výpočtem, komparativní test, experimentální validaci a závěrečné zhodnocení. Cíle jsou stanoveny v souladu s pravidly pro tento typ kvalifikačních prací logicky a strukturovaně, odrážejí širí zvoleného tématu a lze konstatovat, že stanovených cílů bylo dosaženo ve všech bodech.

3. Vyjádření k postupu řešení problému

Práce je řešena systematicky správně, má logický vývoj a dokumentuje schopnost doktoranda aplikovat metody vědecké práce na řešení zadaného problému. Odráží též schopnost vyváženého přístupu k interpretaci výsledků výpočtů a měření. Autor použil vědecké metody literární rešerše, analýzy, matematického modelování a simulace, experimentálního měření a syntézy získaných poznatků. Metody byly zvoleny adekvátně k řešené problematice a dokládají schopnost vědecké práce autora.

Z hlediska postupu řešení problému bych ocenil podrobnější vysvětlení toho, co disertant považuje za systémy s akumulací – zda se jedná o akumulaci tepla do stavebních konstrukcí, nebo např. aktivní systémy se zásobníky teplé vody. Tuto část postrádám

v analytické části práce i následně v závěru, kde není jednoznačně uvedeno, pro které systémy s akumulací tepla je posuzovaný sw vhodný.

4. Posouzení písemného projevu a celkové grafické úpravy

Práce je napsána logicky, dokladující schopnost autora zpracovat uceleně zadané téma. Grafická úprava je velmi dobrá, obrázky zpracovány pečlivě, grafy čitelné. Orientaci v textu a srozumitelnost zhoršuje nezvyklé množství vlastních zkratek autora (např. PDR, DR, CM, DOF, ...), z nichž ne všechny jsou uvedeny v seznamu použitých zkratek (např. SPT).

5. Otázky k obhajobě

Na str. 57 v tab. 8.1 jsou uvedeny hodnoty fyzikálních veličin popisujících model, kde se pracuje např. s teplotou 60 °C, měrnou tepelnou kapacitou 1700 J.kg⁻¹.K⁻¹. O jaký materiál a modelovaný prvek se jedná?

V návaznosti na poznámku v bodě 3 tohoto posudku uveďte prosím konkrétní příklady systémů s akumulací tepla, kde by bylo vhodné sw COMSOL použít.

6. Komplexní závěrečné posouzení

Předložená práce je zpracována na velmi dobré úrovni a splňuje svým rozsahem i obsahem zadané téma. Doporučuji proto, aby práce byla přijata a Ing. Vladimíru Gerlichovi byl po její úspěšné obhajobě udělen titul Ph.D.

V Praze, 6.10.2012



prof. Ing. Karel Kabele, CSc.

OPONENTSKÝ POSUDEK DISERTAČNÍ PRÁCE

Téma práce: **Ověření možností využití programu COMSOL Multiphysics jako prostředí pro simulaci tepelného chování systémů s akumulací**

Doktorand: **Ing. Vladimír Gerlich**

Studijní obor: **Inženýrská informatika**

Téma disertace

Tématika modelování a simulací chování budov a systémů techniky prostředí je aktuální - pro řešení v současné době existuje několik komplexních programů. Program COMSOL Multiphysics, který byl vyvinut pro aplikace v oblasti tepelných procesů a proudění ve strojírenství a elektrotechnice, svojí strukturou umožňuje i širší použití (dosud neuplatněné) v oblasti techniky prostředí. Téma disertace je proto významné a splňuje nároky na doktorské studium.

Obsah práce

Předložená disertační práce má celkem 157 stran. Úvodní část v rozsahu 20 stran zahrnuje resumé, seznamy obrázků, tabulek, použitých symbolů a zkratk a popisuje strukturu disertace. Literární rešerši věnoval autor 3 strany, v dalším textu práce jsou však i další odkazy a prameny, především na dílčí řešené problémy. Teoretická část práce v rozsahu 24 stran zahrnuje témata přenosu tepla ve vnitřním prostředí budov, nástrojů pro modelování fyzikálních dějů a numerického řešení diferenciálních rovnic. Experimentální, nejrozsáhlejší část (51 stran) obsahuje postupy a výsledky validací analytickými modely, srovnávacím testem IEA Bestest Task 34 a měřením autora. Závěrečná část (6 stran) shrnuje výsledky práce a uvádí přínosy pro vědu a praxi. Práce je zakončena seznamem publikací autora, seznamem použité literatury a životopisem autora. Přílohová část obsahuje tabulky, grafy, schémata a fotografie vztahující se především k experimentální části práce.

Cíle disertace

Hlavní cíle disertační práce jsou uvedeny na straně 24:

1. Teoretický a analytický rozbor dané problematiky
2. Analytická verifikace – porovnání výsledků modelů získaných analytickým a numerickým výpočtem
3. Komparativní test – porovnání hodnot vypočtených několika simulačními programy
4. Experimentální validace – porovnání naměřených hodnot průběhů teploty s numerickým modelem.
5. Zhodnocení schopností simulačního softwaru.

Podle mého názoru byly cíle práce splněny na odpovídající úrovni a v potřebném rozsahu.

Rozbor současného stavu řešené problematiky

Vzhledem k tomu, že problematika modelování a simulací budov a zařízení techniky prostředí patří k velmi rozvíjejícímu se oboru, očekával bych podrobnější analýzu dosud publikovaných prací o provedených simulacích s programem CM. Rovněž informace autora o nesplnění požadavků kladených na použitelnost nástroje ESP-r (str. 41) a přednostech nástroje CM představeným v [17] (str. 41) jsou stručné.

Metody řešení a jejich aplikace

Práce je založena na validaci programu Comsol Multiphysics analytickým ověřením, porovnáním s ostatními simulačními nástroji a experimentální validací (s použitím naměřených hodnot autora).

Validace programu CM pomocí odvozeného analytického modelu zahřáté desky dává velmi souhlasné výsledky, což (ve shodě s autorem) bylo možné očekávat.

U validace modely popsány v ASHRAE 1052-RP Toolkit postrádám určení, kdy se jednalo o prostorové řešení a kdy o jednalo o jednorozměrný případ. Velmi dobrou shodu poskytují testy 4 skupin z celkem pěti skupin, které poskytuje benchmark ASHRAE. Test skupiny 2 (sluneční zisky a vliv zastínění) který nebylo možno provést, ukazuje na určité omezení využití programu CM pro budovy a zařízení techniky prostředí, kde vliv sluneční radiace může být podstatný. Ostatní testy poskytly velmi dobrou shodu.

Validace srovnávacím testem IEA Bestest Task 34 prokazuje příznivější výsledky u nestacionárních variant modelů, než u variant modelů stacionárních.

Celkově lze konstatovat, že autor provedl testy pečlivě s určením standardních odchylek a prokázal, že validovaný program CM je použitelný v aplikacích, které jsou koncepčně shodné (podobné) s variantami testovaných modelů.

Experimentální validace je založena na porovnání výsledků měření autora v laboratorní místnosti s modelem vytvořeným v programu CM. Experimenty byly provedeny v dvou zimních obdobích 2010 a 2011. Jako hlavní porovnávací parametr získaný měřením byla zvolena teplota kulového teploměru umístěného ve středu místnosti (autor tuto teplotu nesprávně označuje jako operativní teplotu). Z popisu modelu v programu CM však vyplývá, že simulací byla modelována teplota vnitřního vzduchu (obr. 10.4). Autor srovnává dvě neshodné veličiny, rozdíl teploty kulového teploměru (výsledné teploty) a teploty vzduchu pravděpodobně nebude podstatný, při obhajobě by však autor měl tuto skutečnost vysvětlit.

Přínosnou částí práce je analýza vlivu součinitele přestupu tepla na stěnách. První verze modelu počítala s konstantní hodnotou součinitele přestupu tepla $2,5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. V druhé verzi model počítal s hodnotami součinitele přestupu tepla podle aktuálních hodnot rozdílů teploty povrchu stěn a vnitřního vzduchu.

Použité validační metody byly v disertaci vhodně aplikovány a získané poznatky rozšířily a upřesnily poznatky o využitelnosti programu CM.

Teoretický a praktický přínos disertační práce

V disertační práci, která se zabývá ověřením možností využití programu CM autor v teoretické části popsal základní teoretické možnosti výpočtu přenosu tepla v objektech s akumulací a při jednotlivých validačních krocích prokázal, že v dané teoretické oblasti se dobře orientuje. Teoretickým přínosem je i podrobná analýza součinitele přestupu tepla na vnitřních stěnách místností.

Praktickým přínosem práce je ověření možností využití programu CM pro systémy s tepelnou akumulací a současně i konstatování omezení, která neumožňují program CM použít pro výpočty objektů zatížených sluneční radiací. Za perspektivní považují možnost zapojení modelů vytvořených v programu CM jako řízené soustavy do regulace a řízení těchto modelů.

Úroveň znalostí v oboru

Doktorand Ing. Vladimír Gerlich prokázal odpovídající znalosti, které disertace vyžadovala v oblasti přenosu tepla a výpočetní techniky. V obou těchto oblastech interdisciplinárního charakteru prokázal schopnost samostatně pracovat, vytvářet i analyzovat modely a tvůrčím způsobem je aplikovat.

Formální úroveň práce

Předložená práce je psána srozumitelně a přehledně. Text je vhodně doplněn obrázky, grafy a tabulkami. Několik formálních chyb (překlepy např. na str. 92, na str. 14 tíhové zrychlení: rozměr má být m/s^2) neznehodnocuje celkovou úroveň práce.

Otázky pro doktoranda

K předložené disertační práci mám dva dotazy:

1. Pro jaké typické případy simulací chování budov a zařízení techniky prostředí by bylo možné program CM využít a pokud má autor zkušenosti s jinými programy, jaké jsou přednosti programu CM.
2. Experimentální validace srovnává teplotu výslednou (teplotu kulového teploměru) a teplotu vzduchu. Proč bylo toto porovnání použito a jaké rozdíly mezi uvedenými teplotami lze očekávat.

Celkové hodnocení

Disertační práce přináší poznatky, které rozšiřují možnosti použití programu COMSOL Multiphysics pro aplikace v oblasti chování budov a zařízení techniky prostředí. Doktorand prokázal schopnost samostatně pracovat tvůrčím způsobem. Kladně hodnotím pečlivě provedené validační testy, v závěru práce mohl doktorand výsledky své práce více využít pro praktická doporučení. Podle mého názoru doktorand splnil požadavky na disertační práci dané zákonem o vysokých školách, takže **disertační práci Ing. Vladimíra Gerlicha doporučuji k obhajobě.**

V Praze 20. srpna 2012



Prof. Ing. František Drkal, CSc.
Ústav techniky prostředí
ČVUT v Praze. Fakulta strojní

Doc. Ing. Jiří Hirš, CSc.
Ústav technických zařízení budov
Fakulta stavební, VUT v Brně
Veveří 331/95, 602 00 Brno
e-mail: hirs.j@fce.vutbr.cz

Oponentský posudek disertační práce doktoranda Ing. Vladimíra Gerlicha, vypracované na téma:

„Ověření možnosti využití programu COMSOL Multiphysics jako prostředí pro simulace tepelného chování systémů s akumulací.“

Posudek byl zpracován na základě jmenování oponentem děkanem Fakulty aplikované informatiky, Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně dopisem ze dne 23. 7. 2012.

Aktuálnost tématu disertační práce

Předložená disertační práce svým zaměřením spadá obecně do oblasti stavební tepelné techniky se zaměřením na simulaci přenosu tepla. Práce je vysoce originální a dosažené výsledky mohou být využity i v jiných oblastech stavební fyziky.

Dosažení cíle stanoveného v disertaci

Doktorand si ve své práci stanovil obecný cíl: ověřit vhodnost a možnosti komerčního softwaru COMSOL Multiphysics pro simulaci přenosu tepla v budovách, který je rozdělen následovně:

1. teoretický rozbor problematiky
2. analytická verifikace
3. srovnání s jinými softwary
4. validace experimentem
5. závěrečné zhodnocení softwaru

Lze konstatovat, že všechny vytčené dílčí cíle byly zcela splněny.

Vhodnost použitých metod a postupu řešení

Doktorand ve své práci vychází z podrobně zpracované literární rešerše dané problematiky reflektující i světový stav poznání v dané oblasti. Pro řešení použil vhodné teoretické a experimentální metody. Doktorand postupoval při ověřování v logickém sledu: srovnání s analytickými metodami, srovnání s již validovanými softwary a na závěr validace experimentem.

Teoretický a praktický přínos disertační práce

Hlavní přínosy výsledků disertační práce pro vědu a praxi shrnul disertant v kapitole 12. Jedná se zejména o nastínění dalších možností využití programu COMSOL Multiphysics a propojení programu s řešením problematiky technické praxe.

Úroveň znalostí doktoranda v daném oboru

Doktorand prokázal velmi dobrou znalost teorie řešené problematiky. Bohatá publikační činnost v domácích i zahraničních časopisech a ve sbornících konferencí svědčí o výrazných aktivitách disertanta a průběžném zveřejňování dílčích výsledků zkoumané problematiky. Na základě posouzení předložené práce a z publikačních výstupů disertanta mohu konstatovat, že jeho znalosti ve studijním oboru Inženýrská informatika jsou velmi dobré úrovní.

Formální úroveň disertační práce

Práce je logicky členěna a má velmi dobrou grafickou úroveň. Obrázky v příloze F, 17.10 až 17.15 jsou málo čitelné.

Připomínky a dotazy k výsledkům disertační práce

- a) Nejednotné značení veličin: čas t i τ , (např. vztah 24). U některých vztahů není jasné, zda jsou odvozeny nebo převzaty – viz např. 7 až 10, domnívám se, že zde chybí citace.
- b) Dělení sítí na strukturované a nestrukturované uvedené na str. 64 je správné, ale vyhodnocovat jen podle toho kritéria a počtu buněk chybu výpočtu je zavádějící, protože například při použití čtyřstěnů hraje významnou roli také jejich tvar, přesněji jejich zkosení.
- c) V práci není diskutována role typů řešičů soustav rovnic na přesnost simulací.
- d) Je zarážející, že test TC3 neobsahuje jednoznačný návod na stanovení počátečních podmínek simulace. Obr. 8.6 tak nechtěně ukazuje jak je možné i volbou zcela nesprávné počáteční podmínky dosáhnout již po cca 18 hodinách velmi dobré shody. U všech testů v kapitole 8, 9 by bylo vhodné je doplnit podrobnějším popisem s obrázky pro jejich lepší pochopení.
- e) Některé zkratky nejsou uvedeny v seznamu zkratek a znesnadňuje to tak porozumění textu, např. „SPT“ na str. 57.
- f) Popis testů dle ASHRAE uvedený na str. 62 a dále není příliš srozumitelný. Pro plné pochopení by bylo vhodné text doplnit obrázky.
- g) V disertační práci zcela postrádám zmínku o požadavcích normy ČSN EN ISO 10211 část 1 a 2, která velmi vhodně definuje požadavky na softwary pro simulaci přenosu tepla, jakým je kritérium jemnosti výpočetní sítě, kritérium ukončení iteračního výpočtu apod.
- h) V kapitole 10 není jasný způsob modelování přenosu tepla sáláním v programu CM. Rovnice 42 pro to není dostatečným vysvětlením. Chybí zde úhlový (view) faktor a definice metody jeho stanovení. Není jasné, co reprezentuje zde použitý součinitel emisivity – emisivitu kterého povrchu?
- i) Není jasné, jakým způsobem je v CM matematicky popsáno proudění vzduchu v místnosti, rovnice 41. Jsou zde respektovány Navier-Stokesovy zákony apod., nebo o jaký model se jedná a které veličiny jsou jeho vstupem? Rychlost proudění vzduchu se zadává, nebo je počítána? V případě že se volí tak, jak? Jak byly zohledněny zisky ze sluneční radiace a měnící se intenzita a směr dopadu slunečních paprsků na vnitřní konstrukce během dne?

Dotazy k obhajobě:

- 1) Co je myšleno nemožností ověření správnosti modelu v tab. 7.1?
- 2) Vysvětlete počáteční podmínky v čase 0 v grafu na obr. 8.6 na str. 67. Lze doporučit toto řešení pro krátkodobé simulace do 24 hodin?

Závěrečné vyjádření

Disertant v předložené disertační práci prokázal schopnost samostatně vědecky pracovat. K práci nemám zásadní kritické výhrady. Dotazy uvedené v posudku slouží k objasnění a doplnění dílčích výsledků práce. Předloženou disertační práci doporučuji k obhajobě.

Doporučuji, aby po úspěšné obhajobě disertační práce byl Ing. Vladimíru Gerlichovi udělen akademický titul „doktor“, ve zkratce „Ph.D.“

V Brně 30. 9. 2012



doc. Ing. Jiří Hirš, CSc.