

**Vedecká rada Fakulty elektrotechniky a informatiky
Slovenskej technickej univerzity v Bratislava**

Ing. Stanislav Števo

**INTELLIGENTNÉ BUDOVY, MODELOVANIE
PODPORA PRI PROJEKTOVANÍ**

Autoreferát dizertačnej práce

Na získanie vedecko-akademickej hodnosti philosophiae doctor v odbore
doktorandského štúdia: 9.2.7 Kybernetika

Bratislava, január 2010

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Ústave riadenia a priemyselnej informatiky, Fakulty elektrotechniky a informatiky, Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ: **Ing. Stanislav Števo**
Ústav riadenia a priemyselnej informatiky
Fakulta elektrotechniky a informatiky, STU
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: **Doc. Ing. Igor Hantuch, PhD.**
Ústav riadenia a priemyselnej informatiky
Fakulta elektrotechniky a informatiky, STU
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: **prof. Ing. Dušan Petráš, PhD.**
Katedra technických zariadení budov
Stavebná fakulta, STU
Radlinského 11, 813 68 Bratislava

Ing. Ladislav Piršel, PhD.
Johnson Controls International spol. s. r. o.
Seberíniho č. 1, 821 03 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa 26.4.2010

Obhajoba dizertačnej práce sa koná 13.5.2010 o 9.00 hod.

Pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktorandského štúdia, vymenovanou predsedom spoločnej odborovej komisie dňa 26.4.2010 číslo odboru: 9.2.7, odbor doktorandského štúdia: Kybernetika na Ústave riadenia a priemyselnej informatiky, Fakulty elektrotechniky a informatiky, Slovenskej technickej univerzity, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

doc. Ing. Ján Vajda, CSc
dekan Fakulty elektrotechniky a informatiky,
Slovenskej technickej univerzity v Bratislave

OBSAH

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV	
1 ÚVOD (FORMULÁCIA PROBLÉMU)	1
2 SÚČASNÝ STAV VO SVETE	2
3 VIRTUÁLNA REALITA, SIMULAČNÉ SOFTVÉRY	3
4 EVOLUČNÉ VÝPOČTY	4
5 ZÁKLADNÉ PRINCÍPY TEPELNÝCH DEJOV	4
6 POTREBA TEPELNÉHO PRÍKONU	5
7 CIELE A METODIKA DIZERTAČNEJ PRÁCE	6
8 MODEL DOMU	6
9 ZOSTAVENIE SIMULÁCIE	8
10 OPTIMALIZÁCIA VYKUROVACIEHO PROCESU POMOCOU GA	11
10.1 Variant A - Kritérium dosiahnutia predpísaných teplôt	11
10.2 Variant B - Kritérium dosiahnutia predpísaných teplôt a zvoleného komfortu	15
10.3 Variant C - Kritérium dosiahnutia pred. teplôt podľa vonkajších podmienok	16
11 DISKUSIA K VÝSLEDKOM	17
12 PRÍNOSY A ZÁVER DIZERTAČNEJ PRÁCE	19
LITERATÚRA	24
ZOZNAM PUBLIKOVANÝCH PRÁC	25
SÚHRN	28
SUMMARY	28

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

Symbole latinky

b_o, b_u	Boolovské koeficienty, pre zložky fitness
<i>CAD</i>	Computer Aided Design
<i>CAE</i>	Computer Aided Engineering
<i>CAM</i>	Computer Aided Manufacturing
<i>CATIA</i>	Computer Aided Three-dimensional Interactive Application
<i>FEM</i>	Finite Element Method
<i>GA</i>	Genetický Algoritmus
<i>GUI</i>	Graphical User Interface
<i>IB</i>	Inteligentná Budova
<i>KASR</i>	Katedra Automatizovaných Systémov Riadenia, FEI STU
<i>LTH</i>	Low Temperature Heating
<i>STN</i>	Slovenská Technická Norma

Symbole gréckej abecedy

α_T	Koeficient definujúci rozsah teplôt	
β, γ	Koeficienty pre váhovanie zložiek fitness	
θ_p	Požadovaná teplota v miestnosti	[°C]
$\theta_s(k, s)$	Teplota v bode k v miestnosti s	[°C]
θ_{avr}	Priemerná teplota miestnosti	[°C]

1 ÚVOD

Modelovanie a simulácia rôznych predmetov, či procesov sú s človekom spojené už mnoho rokov. S priebehom času sa modelovanie a simulácia, tak ako aj mnoho iných činností, presunula na počítače. Najmä simulácia a následná analýza výsledkov by bez nich bola v niektorých prípadoch takmer nemožná. Jednou z najzákladnejších otázok, ktorá sa týka každého z nás, je otázka bývania. Realizovať svoje predstavy o bývaní možno rôzne. Niekomu vyhovuje byť v osobnom vlastníctve, inému byť v nájomnom bytovom dome, ďalší snívajú o stavbe rodinného domu, iní sa púšťajú do rekonštrukcie staršieho objektu.

Aby sa však v dome príjemne bývalo, hlavne v zime, musí dokonale fungovať vykurovací systém. A to sa bez špecialistov zvládnuť prakticky nedá. Podsystem vykurovania zabezpečuje optimálnu teplotu v miestnosti v závislosti od prítomnosti osôb, požadovaného prevádzkového režimu a vonkajších podmienok. Každá miestnosť má iný prevádzkový režim, napr. iná teplota je na schodisku, iná v kancelárii, obývacej izbe, kúpeľni atď.

Jedna simulácia nám ukáže, ako sa bude javiť konkrétne riešenie v skutočnosti. Sledovaním parametrov riešenia počas simulácie môže byť rozhodnuté, či je dané riešenie vyhovujúce podľa zadaných kritérií. Pre iné riešenie sa spustí znovu simulácia a sledujú sa opäť parametre pre vyhodnotenie kvality riešenia. Ak sa tento proces algoritmizuje (zautomatizuje) umožní nám nájsť najlepšie riešenie z pomedzi vybraných riešení alebo nájsť optimálne riešenie pre danú kombináciu intervalov, v ktorých sa parametre môžu pohybovať. Simulácia teda tvorí východiskový bod pre optimalizáciu.

Optimalizácia daného riešenia teda bude iteračný proces, v ktorom rozhodujúcu úlohu zohrajú kritériá podľa, ktorých bude vhodnosť riešenia posudzovaná. Napríklad pre subsystém vykurovania môžu byť takéto kritériá zvolený komfort, cena riešenia (vykurovacieho subsystému, vykurovacieho subsystému + stavebná konštrukcia), energetická efektívnosť (minimalizácia tepelných strát) atď. Takýmto iteračným procesom sa môže dopracovať k optimálnemu riešeniu z hľadiska zvolených kritérií a začiatočných intervalov parametrov riešenia.

Poskytnúť teoretický základ pre rýchlu orientáciu v tejto náročnej a veľmi rýchlo sa vyvíjajúcej problematike, popis nového prístupu pre návrh vykurovacieho systému, jeho metodiky ako aj prijateľný návod použitia s analýzou výhod a obmedzení tohto prístupu si kladie za cieľ predložená dizertačná práca.

Kapitoly **2 až 5** sú venované **prehľadu súčasného stavu** a tvoria teoretický podklad potrebný pre ostatné kapitoly. Tieto kapitoly sú konceptuálne zamerané na prehľad riešení a možností **IB vo svete** (kap. 2), **virtuálnej reality, simulačným softvérom** (kap. 3), problematike **evolučných výpočtov** (kap. 4) a základným **princípov tepelných dejov** (kap. 5).

V kapitolách **8 až 12** sú rozpracované jednotlivé ciele dizertačnej práce (prvý cieľ je spracovaný v kap. 6, ktorá však tvorí teoretickú kapitolu) a sú koncipované podľa kauzality tvorby simulácie, resp. samotnej optimalizácie. Objekt **genetického algoritmu** (kap. 10) je **simulácia tepelných procesov** (kap. 9) vo zvolenom objekte, resp. jeho **3D modeli** (kap. 8). V rámci vykurovania je k dispozícii viacero možností v rámci voľby **vykurovacej sústavy** (kap. 6) ako aj metodiky jej návrhu (kap. 6).

Vyhodnotenie výsledkov práce (diskusia k výsledkom) ako aj jej **prínos pre vedu a prax** sú zhrnuté v jedenástej a dvanástej kapitole.

Súčasťou práce je zoznam použitých symbolov a skratiek, zoznam literatúry a zoznam publikovaných prác.

2 SÚČASNÝ STAV VO SVETE

Význam pojmu „inteligentná budova“ možno výstižným spôsobom popísať nasledovnou formuláciou: Inteligentné budovy sú objekty s integrovaným manažmentom, t.j. so zjednotenými systémami riadenia (technika prostredia, komunikácia, energetika), zabezpečenia (kontrola prístupu, požiarne ochrana, bezpečnostný systém) a správy budovy (plánovanie, prenájom, leasing, inventár). Optimalizáciou týchto zložiek a vzájomných väzieb medzi nimi je zabezpečené produktívne a nákladovo efektívne prostredie. Inteligentná budova pomáha vlastníčkovi, správcovi i užívateľovi realizovať ich vlastné ciele v oblasti nákladov, komfortu prostredia, bezpečnosti, dlhodobej flexibility a predajnosti. Inteligentná budova uspokojuje súčasné potreby vlastníka i nájomcu budovy a môže byť jednoducho prispôbena ich rastúcim nárokom v budúcnosti, umožňuje úspory obstarávacích i prevádzkových nákladov. [2]

K základným požiadavkám vlastníkov a užívateľov budov patria predovšetkým:

- minimalizácia nákladov na energiu
- minimalizácia prevádzkových nákladov
- minimalizácia nákladov na opravy a rekonštrukcie
- flexibilita prenajatých priestorov
- kvalita prostredia budovy prispievajúca k zvýšeniu produktivity práce

Energetická náročnosť

Je potrebné si uvedomiť, že inteligenciu budovy nezabezpečuje iba kvalitný riadiaci algoritmus. Najlepšie je to možné pozorovať na energetickej náročnosti. Energetická náročnosť budovy závisí od veľkého množstva faktorov. Tieto faktory je možné rozdeliť do štyroch základných skupín [3]:

- Geometria budovy
- Parametre konštrukčných prvkov
- Parametre techniky prostredia budovy
- Interakcie budova – vonkajšie prostredie

Zhodnotenie

Zo stručného prehľadu IB (kap. 2) je zrejmé, že existuje mnoho oblastí každého systému v rámci budovy, v ktorých je možné hľadať miesto pre ďalší rozvoj, optimalizáciu, výskum a vývoj. Bol vybraný systém vykurovania a to z dôvodu, že spotreba energií určenej na vykurovanie a chladenie je rovná približne 60 % celkovej spotrebovanej energie budovy [4]. Táto oblasť je preto z hľadiska spotreby energií majoritnou a zaslúži si čo najväčšiu pozornosť, či už z pohľadu úspor alebo softvérových možností ako podpory pre túto oblasť.

3 VIRTUÁLNA REALITA, SIMULAČNÉ SOFTVÉRY

Každú simuláciu môžeme chápať ako samostatný projekt a využiť zásady riadenia projektov. Znamená to definovať úlohy, navrhnuť ich logickú a časovú nadväznosť, určiť potrebné ľudské a výpočtové zdroje, finančné nároky a dobu úhrady vložených prostriedkov.

CATIA V5

Je multiplatformový CAD/ CAM/ CAE komerčný softvérový nástroj vyvinutý francúzskou spoločnosťou Dassault Systems a celosvetovo predávaný spoločnosťou IBM. Catia vznikla na prelome sedemdesiatych a osemdesiatych rokov minulého storočia pre vývoj Dassaultovho bojového lietadla – Mirage a neskôr bol použitý v leteckom, kozmickom, lodiarenskom priemysle ako aj v iných priemyselných odvetviach. Catia je priamy konkurent k nástrojom ako Siemens NX, Pro/ENGINEER, SolidWorks, Autodesk Inventor a SolidEdge [9].

Comsol Multiphysics

Je určený všetkým vývojárom, výskumným i vedeckým pracovníkom. Tento prístup umožňuje jedinečné preniknutie do podstaty fyzikálnych procesov. Do riešenia je možné zahrnúť niekoľko fyzikálnych vplyvov súčasne (multifyzikálne úlohy) a tak uskutočniť komplexnejšiu analýzu modelu. Comsol Multiphysics je tesne spojený prepojený s univerzálnymi nástrojmi Matlab a Comsol Script určenými pre vedecko-technické výpočty. Funkcie týchto nástrojov je možné využívať napríklad ku kresleniu geometrických tvarov, generovaniu FEM sietí alebo pri konečnom spracovaní výsledkov úlohy [10].

Matlab

Dnes je Matlab považovaný za štandardný a univerzálny výpočtový nástroj v oblasti techniky, vedy a výskumu. Je to základná výpočtová platforma, ktorá sa dá rozširovať o ďalšie funkcie z rôznych oblastí vedy a techniky. K dnešnému dňu sa eviduje viac ako 100 rozširujúcich balíkov – toolboxov.

Zhodnotenie

Ako je možné vidieť zo stručnej charakteristiky uvedených softvérových prostriedkov, možnosti počítačového modelovania a simulácie sú takmer neobmedzené. Rôzne simulačné softvéry nám umožňujú simulovať fyzikálne, ekonomické, ekologické, sociálne a rôzne iné procesy v rámci rôznych modelov reálneho sveta, ktoré sa líšia či už vnútornou reprezentáciou ako aj samotným účelom v rámci sledovaného cieľa.

Z hľadiska simulácie tepelných procesov, prestupov tepla, vzniku tepelných prúdov a pod. sa javí najlepšie použitie softvéru Comsol Multiphysics, pretože v jednom kroku sme schopný riešiť úlohu z rôznych fyzikálnych aspektov (čo sa javí ako výhodné - šírenie tepla, tepelné prúdy a pod.). Výhodou tohto softvéru je aj jeho široká kompatibilita s inými existujúcimi programovými balíkmi (import modelu z soft. CATIA V5 a prepojenie s Matlab-om).

4 EVOLUČNÉ VÝPOČTY

Evolučné výpočty sú univerzálne numerické prehľadavacie/ optimalizačné metódy využívajúce stochastické javy a kopírujúce prirodzený evolučný proces. Ich základnými nástrojmi sú náhodné zmeny vo vlastnostiach jedincov, výber úspešnejších jedincov na úkor menej úspešných a veľký výpočtový objem. Elektronickou rýchlosťou sú schopné v prijateľnom čase simulovať státisíce evolučných cyklov, ktoré prebiehali v prírode milióny rokov. Tak vedia dosiahnuť veľmi vysokú úspešnosť v porovnaní s konvenčnými metódami. Pod prijateľným časom si môžeme predstavovať výpočtové časy od niekoľkých sekúnd až po desiatky hodín, niekedy aj viac

Základne pojmy, objekty a operácie GA

Genetické algoritmy (GA) sú jedným z najvýznamnejších a najčastejšie používaných predstaviteľov evolučných výpočtových techník s rôznorodým uplatnením. Základnými objektmi v GA sú reťazec, gén a populácia. Základnými operáciami, ktoré s týmito objektmi narábajú, sú kríženie, mutácia a výber.

Keďže je genetický algoritmus univerzálna optimalizačná metóda, je vhodná aj pre náš zámer, optimalizovať úlohu návrhu subsystému vykurovania. Z tohto pohľadu je možné zvoliť rôzny počet parametrov, ktoré budeme optimalizovať rovnako aj účelovú funkciu. Účelová funkcia teda bude reflektovať nami zvolené kritérium vhodnosti riešenia.

Druhý dôležitý dôvod, prečo sme sa rozhodli pre GA, je existencia vytvoreného toolboxu pre genetický algoritmus (vytvorený na KASR, FEI STU). Tento toolbox sa používa v prostredí Matlab (3.3.3) a obsahuje všetky základné metódy, ktoré budeme potrebovať pre vytvorenie GA (viď. Príloha A). Ďalšou nesmiernou devízou je ľahká prepojitelnosť Comsol-u Multiphysics a Matlabu, čo prináša mnoho zjednodušení. (Realizácia tohto prepojenia je bližšie popísaná v kap. 9.6)

5 ZÁKLADNÉ PRINCÍPY TEPELNÝCH DEJOV

Tak, ako prírodné deje, aj tepelné procesy sa riadia všeobecne platnými fyzikálnymi zákonmi. S tepelnými procesmi sa stretávame napríklad v chemickom priemysle, potravinárstve, teplárňach alebo elektrárňach [16]. Počítačová simulácia tepelných dejov je vo väčšine prípadov založená na metóde konečných prvkov.

V súčasnosti je metóda konečných prvkov (Finite Element Method, FEM) najuniverzálnejšia variačná metóda, ktorá sa využíva na riešenie širokého spektra technických, ale aj vedeckých problémov, **ktoré sú opísateľné pomocou parciálnych diferenciálnych rovníc**. Metóda bola pôvodne vyvinutá ako inžinierska procedúra pre riešenie všeobecných úloh pevnostnej analýzy založených na parciálnych diferenciálnych rovniciach. Dnes sa uplatňuje pri riešení konštrukčných úloh strojnictva, cez simuláciu aerodynamických dejov na krídlach lietadla až po modelovanie elektrickej aktivity srdcového tkaniva. Pomocou metódy konečných prvkov môžeme riešiť problémy lineárneho aj nelineárneho charakteru. Počiatky metódy siahajú do obdobia prvej svetovej vojny (práca Couranta publikovaná v r. 1943).

6 POTREBA TEPELNÉHO PRÍKONU

Na výpočet potreby tepla (tepelného príkonu) pre priestory slúžia príslušné smernice a stanovené výpočtové metódy (napr. v Nemecku DIN 4701, vo Švajčiarsku SIA 384/2, v SR STN EN 12831). [18]

Základom výpočtu tepelného príkonu sú: vnútorné výpočtové teploty, vonkajšie výpočtové teploty, zvolené výpočtové teploty pre rôzne druhy priestorov (strešné priestory, pivničné priestory, priestory v kontakte s pôdou atď.).

Príslušné smernice odporúčajú vnútorné výpočtové teploty, pričom ide o výslednú teplotu (operatívnu teplotu), ktorá zohľadňuje teplotu vzduchu aj účinnú, resp. priemernú teplotu stien obklopujúcich miestnosť.

Tab. 6.1 Vnútorné výpočtové teploty pre vykurované priestory [18]

Druh priestoru	Teplota (°C)
Obytné domy:	
obývacie izby a spálne, kuchyne, toalety	20
kúpeľne	24
chodby, vykurované vedľajšie priestory	15
schodiská	10

V prvej časti tejto kapitoly boli stručne popísaná problematika tepelných strát ako aj potreba tepelného príkonu spolu so základnými poznatkami z tejto oblasti.

Stručný výňatok z noriem popisujúcich návrh vykurovacieho subsystému priblížil danú problematiku, z čoho je evidentné, že návrh tohto subsystému z hľadiska stanovených podmienok a voľby typu vykurovania nie je vôbec triviálny. Táto časť bližšie popisuje metódy výpočtu projektovaného tepelného príkonu, funkčné požiadavky na tepelnú ochranu budov, vlastnosti prostredia a stavebných výrobkov ako aj výpočtové metódy v rámci tepelnej ochrany bodov.

Záverečná časť kapitoly je venovaná vykurovacím telesám a plochám. Možnosti v rámci vykurovacích objektov sú veľmi široké, preto sa môže rozhodnúť pre viacero samostatných techník vykurovania (vykurovacie panely, podlahové vykurovanie, stropné vykurovanie, fasádne vykurovanie atď.) ako aj ich vzájomnej kombinácie.

Z nášho hľadiska je postačujúce rozlíšiť pár základných vlastností, v ktorých sa spomenuté elementy líšia a to napr. cena, dynamika vykurovania, použiteľnosť v jednotlivých objektoch a pod. Preto (ako bude ukázané neskôr) pre zachovanie relatívne nízkeho výpočtového času optimalizácie, je nutné uvažovať len najpoužívanejšie (najrozšírenejšie) spôsoby vykurovania a v prípade požiadaviek užívateľa o iný typ, sa algoritmus už ľahko modifikuje (rozšíri o požadovaný spôsob vykurovania).

7 CIELE A METODIKA DIZERTAČNEJ PRÁCE

Dizertačná práca má za úlohu analyzovať možnosti použitia zvoleného prístupu pre **návrh vykurovacieho subsystému** pre segment rodinných domov v porovnaní s klasickým prístupom a navrhnuť prípadné riešenie na elimináciu nedostatkov zvoleného prístupu. Komplexný prístup k problematike návrhu a vyhodnotenia vykurovania podáva syntéza súčasnej teórie a praxe. Vyhodnotenie postavené na takto koncipovaných základoch potom môže potvrdiť alebo vyvrátiť zatiaľ zaužívané pravidlá o vhodnosti, resp. nevhodnosti subjektívne preferovaných systémov, často krát nepodložených potvrdzujúcim výskumom.

Meritom dizertačnej práce je návrh genetického algoritmu, ktorý optimalizuje vykurovací systém daného objektu. Matematické modelovanie fyzikálnych procesov (v rámci vykurovania) využíva 3D model objektu, ktorý je verifikovaný a kalibrovaný podľa reálneho objektu. Poznatky potrebné k správne zostaveniu celého postupu sú zhrnuté v analýze súčasného stavu problematiky a postupov riešení.

1.1 Ciele dizertačnej práce

Tézy kandidátskej dizertačnej práce boli stanovené nasledovne

1. Teoretická analýza klasického prístupu pre návrh systému vykurovania segmentu rodinných domov, podľa STN EN 12 831 (STN 73 0540)
2. Teoretická analýza možností tvorby 3D modelu z pohľadu následnej simulácie (šírenie tepla). Vytvorenie 3D modelu jednoduchého bytu, rodinného domu alebo malej budovy
3. Matematické modelovanie fyzikálnych dejov (šírenie tepla). Nastavenie parametrov simulácie zodpovedajúce vytvorenému 3D modelu (podľa zvolených požiadaviek), kalibrácia a verifikácia modelu
4. Vytvorenie genetického algoritmu, zahŕňajúceho signifikantné parametre z pohľadu užívateľa a sledovaného cieľa. Príprava a realizácia experimentu (niekoľko experimentov). Overenie funkčnosti modelu a nájdenie konkrétnych riešení pre zvolené modely
5. Porovnať efektívnosť novo navrhnutého riešenia s už existujúcim riešením. Na základe vyhodnotenia experimentov posúdiť možnosti vytvorenia softvérového nástroja pre podporu inžiniera pri návrhu subsystémov budovy
6. Vyhodnotiť celkový prínos použitého prístupu, možnosti modifikácie pre budúcnosť

8 MODEL DOMU

Na tvorbu 3D modelu môžeme použiť veľa softvérových nástrojov ako napr. ArchiCAD, 3D Max, AutoCAD (od verzie 2007) ai., ktoré sa líšia svojou „univerzálnosťou“ ako aj výsledným 3D modelom (presnosťou, veľkosťou ai.). 3D model sme vytvorili v nástroji CATIA V5. Aj keď je tento program primárne určený na tvorbu 3D modelov strojných súčastí, preto tvorba 3D modelu väčších komplexov je relatívne zdľhavejšia avšak model je veľmi presný a vhodný pre ďalšie použitie.

Vlastnosti vytváraného modelu

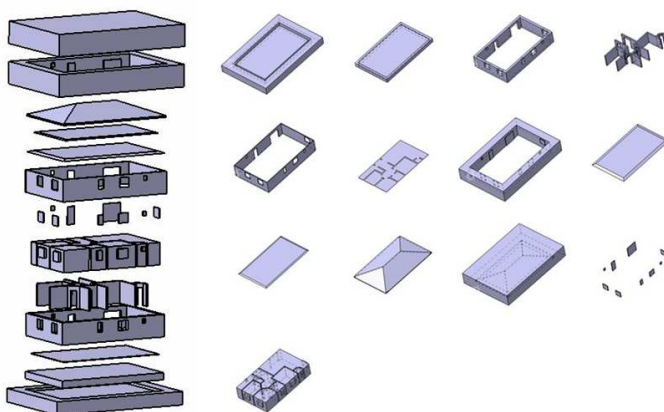
Keďže sme sa rozhodli uvažovať o segmente stredných rodinných domov, vytvorili sme model jednopodlažného rodinného domu (nepodpivničeného). Pre ďalšie použitie modelu, je

najvhodnejšie zostaviť model už existujúceho reálneho modelu, t.j. model sa môže následne kalibrovať podľa nameraných dát na reálnom dome.

Proces tvorby 3D modelu

Do modelu nezahŕňame žiadne zariadenie prvky (sanitárna technika, nábytok ai.) z dôvodu zachovania čo možno najväčšej jednoduchosti modelu. Komplexnosť modelu vo veľkej miere ovplyvňuje náročnosť na výpočtovú techniku v rámci simulácie (bližšie je táto problematika rozvedená v nasledujúcej kapitole).

Aby boli jednotlivé časti domu (priečky, steny, okná atď.) kvalitatívne odlišiteľné, musíme každý objekt v Catii umiestniť do vlastného tela „Body“. Takýmto postupom nám pri vytváraní modelu vznikne 13 samostatných prvkov (zem, základy, steny, vzduch_in, vzduch_out, priečky, dvere_okna, vzduch_strecha, strecha, izolacia_strecha, deka, izolacia_steny, podlahy, obr. 8.3, vid' model_bung.CATpart).



Obr. 8.1 Základné štruktúrne prvky 3D modelu domu

Vytvorenie jedného segmentu 3D modelu

Pre každý segment sa zvolí rovina, v ktorej sa vytvorí základný profil (v *Sketch-eri*). Po určení každého rozmeru vytvoreného profilu a „ukotvení“ ho v priestore (voči určitému vzťažnému konštrukčnému bodu) sa následne „pretlačí“ (inštrukciou *Pad*) do priestoru, čím vznikne 3D objekt. V tomto objekte sa môže zvoliť ďalšia rovina, pomocou ktorej vytvoríme ďalší profil, ktorý sa analogicky pretlačí do 3D objektu. Ten môžeme k objektu pridať alebo ho z neho vyrezať.

Zhodnotenie

Pomocou CAD nástroja CATIA V5 (3.3.1) sme vytvorili 3D model jednopodlažného rodinného domu. Ako je možné vidieť v popise tvorby uvedeného riešenia, zvolený program spĺňa všetky dôležité podmienky, ktoré sú dôležité pri samotnom procese tvorby modelu ako aj jeho využitia v iných simulačných softvéroch, najmä z hľadiska selektovania štruktúrnych prvkov.

9 ZOSTAVENIE SIMULÁCIE

Simulácia umožňuje vopred si "prehrať" správanie sa systému po realizácii opatrení, pozrieť sa do budúcnosti a tak v predstihu "vychytat" prípadné problémy. Ako vidieť, simulácia je v mnohých prípadoch vhodným podporným nástrojom pre projektantov i pre riadiacich pracovníkov. S použitím simulácie získava riadiaci pracovník istotu v tom, že plánované úlohy bude možné v danom časovom rámci skutočne realizovať, pričom animácia priebehu sledovanej veličiny môže pomôcť názorne objasniť a lepšie pochopiť dané procesy.

Simulácia v Comsol Multiphysics

Keďže naimportovaný model neobsahuje vykurovacie telesá, doplnili sme ich jednoduchým spôsobom *Draw -> Block*. Zadaním súradníc prvého bodu (*Axis base point*) a rozmerov (*Length*) jednoducho vytvoríme sedem doskových radiátorov s dimenziami podľa projektu. Vykurovacie telesá by sa dali vytvoriť už priamo v Catii, ale naimportovaním danej geometrie zaniká možnosť modifikácie rozmerov jej štruktúrnych prvkov čo znamená, že by sme nemohli meniť rozmery a umiestnenie jednotlivých prvkov.

Obdobným spôsobom (*Draw -> Point*) sme dodefinovali body, v ktorých sme porovnali výsledky simulácie (teplotu) s nameranými hodnotami.

Definovanie vlastností subdomén

V ďalšom kroku je potrebné zadefinovať vlastnosti subdomén (*Physics-> Subdomain Settings*) t.j. fyzikálne vlastnosti materiálov z pohľadu simulovaných dejov (kap. 5).

Comsol obsahuje širokú knižnicu materiálov (*Library material*) so zadefinovanými parametrami podľa zvoleného aplikačného módu. Celkovo nám vznikne niekoľko skupín objektov, zadefinovaných rôznymi parametrami. Hodnoty jednotlivých fyzikálnych veličín si zadefinujeme v zozname konštánt (*Options-> Constraints...*). V rámci subdomén sú dôležité tepelné vodivosti (*Thermal conductivity*), hustota (*Density*) a merná tepelná kapacita materiálov (*Heat capacity at constant pressure*) [19]

Definovanie vlastností plôch

Podobne ako v predchádzajúcom kroku musíme zadefinovať vlastnosti hraničných plôch (*Physics-> Boundary Settings*). Rovnako môžeme vybrať z knižnice hodnôt koeficientov (súčiniteľov) alebo zvoliť zo štyroch možností pre hraničné plochy: tepelný tok (*Heat flux*), ideálny tepelný izolant (*Thermal Insulation*) a plocha určená konštantnou teplotou (*Temperature*). V tomto bode nastavíme len vonkajšiu teplotu, teplotu zeme a teplotu plôch vykurovacích telies. Teplota sa zadáva v stupňoch Kelvina. Dôležité je nastavenie počiatočných podmienok, všetkých hraničných plôch, ktoré majú iný atribút ako *Continue*.

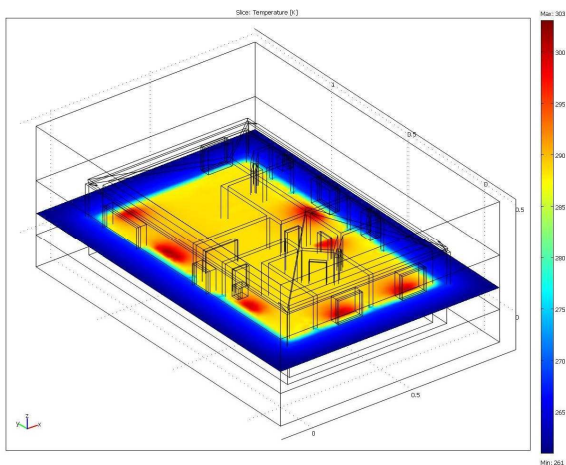
FEM sieť

FEM sieť (sieť bodov vid'. kap. 5.6) môžeme vytvoriť a modifikovať mnohými možnosťami. Samotná sieť má priamy vplyv na presnosť riešenia, jeho konvergenciu aj na samotný čas výpočtu. Rozhodli sme sa pre automatické generovanie siete, pričom sme porovnali módy automatického generovania a ich odpovedajúcu presnosť, pretože pri splnení predpisanej presnosti môže byť vyhovujúca sieť s menším počtom bodov, čo v konečnom dôsledku znamená zrýchlenie hľadania riešenia, teda samotnej simulácie. Z hľadiska genetického algoritmu je akékoľvek zrýchlenie času potrebného na jednu

simuláciu veľmi významné (pretože napr. pri populácií 100 jedincov 1000 generáciách je pri úspore 0.1 sekundy je celková úspora času rovná cca. 3 hodinám).

Grafické zobrazenie riešenia

Postprocessing nástroja Comsol Multiphysics umožňuje rôzne zobrazenia riešenia a rôzne možnosti vyhodnotenia veličín daných aplikačných režimov. Od sledovania charakteristickej veličiny v bode, cez hranovú alebo plošnú integráciu až po integráciu subdomén. Z nášho pohľadu je smerodajné hľadisko teplôt, preto budeme v ďalšom pracovať len s týmto zobrazením. (*Postprocessing -> Plot parameters -> Slice -> Temperature*)



Obr. Zobrazenie riešenia simulácie v režime Slice Plot v rámci sledovania teploty (Predefined quantities: Temperature) vo výške 1m nad podlahou, pohľad Default 3D view

Kalibrácia a verifikácia

Keďže simulácia tepelných dejov vo zvolenom objekte tvorí východiskový bod pre genetický algoritmus, je práve presnosť výsledkov simulácie najdôležitejším faktorom, od ktorého sa následne odvíja presnosť a použiteľnosť následných výsledkov a záverov. Preto je z tohto hľadiska dôležité, aby výsledky simulácie a nameraných dát z reálneho objektu boli v čo najväčšej zhode.

Ak verifikácia ukáže nesúlad realita – simulácia je možné pokúsiť sa model kalibrovat'. Pokiaľ následná verifikácia kalibrovaného modelu s inými dátami potvrdí, že bola dosiahnutá požadovaná presnosť, môžeme prehlásiť, že simulačné výsledky sú vierohodné. V prípade, že ani kalibrovaný model nevykazuje uspokojivé výsledky, treba zmeniť komplexnosť modelu a vykonať celú procedúru verifikácia a kalibrácie až pokiaľ bude dosiahnutá želaná presnosť.

Dosiahnuť zhodu výsledkov simulácie a reálne nameraných dát, resp. správne nastaviť parametre domu t.j. aby sledované veličiny boli v správnom vzťahu k parametrom modelu.

Meranie dát

Merania prebehli pri rešpektovaní uvedených podmienok v decembri 2008 a januári 2009 (viď. príloha D). Namerali sme tri množiny dát, pričom prvá bol použitá na kalibráciu (resp. prvú verifikáciu a následnú kalibráciu) a druhé dve na verifikáciu. Merania boli realizované dotykovým teplomerom s odporovým snímačom (Testo 825-T1). Na meranie teploty vzduchu sa merala teplota hliníkovvej doštičky s rebrovaním o rozmeroch 80 mm x 25 mm x 35 mm. Teplota radiátorov a stien bola meraná priamo dotykovým teplomerom.

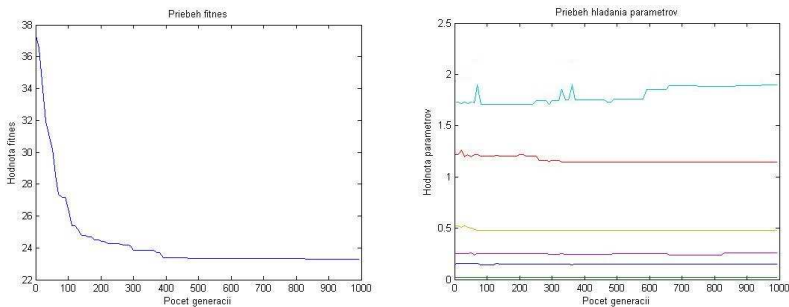
Verifikácia č.1

V tejto časti chceme overiť správnosť výsledkov simulácie v porovnaní s nameranými údajmi. Keďže sa pozornosť zameriava na teplotu v jednotlivých miestnostiach, sústredíme sa na rozdiely teplôt (simulácia - meranie) v bodoch znázornených na obr. 9.3

Z porovnania teplôt je zjavné, že najväčší absolútny rozdiel teplôt bol v bode 287 a to 2.1 stupňa, preto je otázka kalibrácie modelu oprávnená. Rozhodli sme sa tento proces uskutočniť pomocou genetického algoritmu, ktorý nájde optimálnu kombináciu parametrov domu s kritériom najväčšej zhody simulovaných výsledkov a nameraných údajov.

Vytvorenie genetického algoritmu pre kalibráciu modelu domu

Genetickým algoritmom (kap. 4.2) sme sa rozhodli nájsť kombináciu štruktúrnych parametrov domu, tak aby sa dosiahla maximálna zhoda simulácia – reálne dáta. Uvažujeme nasledujúce štruktúrne parametre domu: súčiniteľ prestupu tepla steny, izolácie, priečok, okien, dverí, strechy, podlahy. Ďalej do modifikovaných parametrov zahrnieme okrajové podmienky (teplotné) vnútorných a vonkajších stien.



Obr. 9.11 Priebeh fitness (vľavo), priebeh parametrov - súčiniteľov prechodu tepla ↓ zem, okno, železobetón, strecha (1/2), steny, izolácia (vpravo)

Verifikácia č. 2

Verifikácia bola vykonaná uskutočnením simulácie v nových pracovných bodoch podľa reálnych dát (príloha D) a ich následným porovnaním so simulovanými výsledkami.

Keďže máme 2 množiny meraní, zistili sme, že maximálna odchýlka teplôt medzi prvými dátami (pre verifikáciu) a simulačnými výsledkami je **0,5 °C** a pri druhej množine dát **len 0,4 °C**, z čoho môžeme usúdiť, že novo nastavená simulácia je **dostatočne presná** a v dostatočnej miere reflektuje realitu.

Zhodnotenie

V rámci tejto kapitoly sme uviedli spôsob importu 3D modelu do vybraného simulačného softvéru, procedúru nastavenia parametrov a počiatočných podmienok pred spustením simulácie ako aj možnosti voľby riešičov, vlastností FEM siete a ich vplyv na kvalitu riešenia a výpočtové požiadavky. V rámci verifikácie bolo uskutočnené meranie tepelných charakteristík reálneho objektu a následná verifikácia modelu pomocou týchto dát. Zistený nesúlad (model – realita) bol eliminovaný kalibráciou modelu pomocou genetického algoritmu a následnou verifikáciou v dvoch nových pracovných bodoch sme mohli prehlásiť novo nastavený model za dostatočne presný

10 OPTIMALIZÁCIA VYKUROVACIEHO PROCESU POMOCOU GA

Táto kapitola tvorí ťažisko dizertačnej práce. Pomocou genetického algoritmu hľadáme optimálny vykurovací systém z hľadiska jeho syntézy, t.j. návrh vykurovacieho systému pre zvolený objekt podľa rôznych kritériálnych funkcií.

Princíp algoritmu

Základným princípom genetického algoritmu úlohy ako sme si ju popísali je tvorba rôznych variant vykurovacích telies, t.j. ich rozmerov a rovnako aj ich umiestnení v jednotlivých miestnostiach. Jednotlivé možnosti vykurovacích telies sú dané všetkými kombináciami typov radiátorov (čo sa týka konštrukčnej výšky, šírky, dĺžky a typu zhotovenia) KORAD (viď. Príloha E).

Variant A

Hľadá kombináciu takých vykurovacích zariadení, ktoré splnia základné podmienky dané pre vykurovací systém (kap. 6.6), t.j. v zásade sa sústredíme na to, aby v každej miestnosti bola dosiahnutá odporúčaná teplota (podľa tab. 6.1), bez toho aby sme brali zvlášť ohľad na dosiahnutie komfortu.

Variant B

Podobne ako predchádzajúci variant s tým, že na zreteľ sa berie aj dosiahnutie komfortu, t.j. čo najlepšej tepelnej pohody v každej zvolenej miestnosti.

Variant C

Pre navrhnutý vykurovací systém analyzujeme možnosti použitia podobného GA pre nájdenie optimálnej teploty pre jednotlivé vykurovacie telesá v závislosti od vonkajšej teploty, prúdenia vzduchu. zadaného kritéria.

10.1 Variant A - Kritérium dosiahnutia predpísaných teplôt

Reťazec

Vo zvolenom objekte je 7 vykurovacích telies. Predpokladajme, že vzdialenosť každého radiátora od steny je pevne zvolená, resp. neprestavuje stupeň voľnosti v procese návrhu. Čo do umiestnenia sú stupne voľnosti uvažované len ako pozície (umiestnenie) radiátorov vždy len v jednom smere (popri stene danej miestnosti). Ďalší stupeň voľnosti predstavuje typ

a rozmer radiátora. Jednotlivé rozsahy uvádza tab. 10.1 (pre prípad konštrukčnej dĺžky 60 cm)

Tab. 10.1 Rozsahy génov

č. Rad	1	2	3	4	5	6	7
Smer	y	y	x	y	x	x	x
Umiestnenie	0.050	0.680	0.085	0.610	0.610	0.225	0.505
Rozsah	0.35	0.24	0.25	0.28	0.13	0.18	0.18
Podmienka	0.45	0.95	0.40	0.93	0.77	0.45	0.75

Celkovo teda jeden jedinec obsahuje **28** génov, **21** z nich reprezentuje konštrukčné parametre, ďalších **7** génov reprezentuje ich umiestnenie.

Populácia

Po vykonaní sérií experimentov s rôznymi veľkosťami populácií, ktoré sa sústreďovali hlavne na preskúmanie diverzity, sme sa rozhodli pre 50 prvkovú populáciu, kde je zachovaná potrebná heterogenita a veľkosť populácie nie je zbytočne veľká, čo priaznivo ovplyvňuje výpočtový čas.

Genetika

Kríženie nie je nevyhnutnou podmienkou konvergencie genetického algoritmu avšak v našom prípade sme dosiahli vždy lepšie výsledky ak sme zakomponovali do GA aj kríženie. Použili sme jednobodové kríženie (4.2.3) dvoch rodičovských reťazcov, ktoré sú vybraté náhodne.

Podobne sme použili aditívnu a „obyčajnú“ mutáciu (4.2.3). Aditívnu mutáciu s rovnomerným rozdelením pravdepodobnosti, ktorej maximálnu hodnotu sme určili ako polovicu rozsahu príslušajúceho génu. Podobne aj obyčajná mutácia mutuje gény na náhodnú hodnotu vždy z rozsahu príslušného génu. Mieri oboch mutácií sme zvolili na 0.25 (Príloha A).

Výber

Použili sme výber pomocou váhovaného ruletového kola (4.2.4), pri splnení elitarizmu, t.j. najlepší jedinec (*BestPop*) sa prenáša do novej populácie bezo zmeny.

Fitness

Kvalita riešenia je daná zhodou výsledkov simulácie a predpísaného kritéria, resp. zhodou teplôt v meraných bodoch a predpísanej teploty v jednotlivých miestnostiach (viď. tab. 6.1), teda v obývacích miestnostiach 20 °C (TOI =293K), chodbe 16 °C (TCH =289K) a kúpeľni 24 °C (TK=297K) podľa vzťahu 10.1, kde parameter β určuje aký dôraz sa bude klásť pre dosiahnutie riešenia s minimálnymi konštrukčnými rozmermi.

Fitness je určená podľa vzťahu:

$$Fit(i) = \sum_{s=1}^m \left(\sum_{k=1}^{n(s)} b_u |\theta_s(k, s) - \theta_p(s)| + \beta \cdot \sum_{k=1}^{n(s)} b_o |\theta_s(k, s) - \theta_p(s)| \right) \quad (10.1)$$

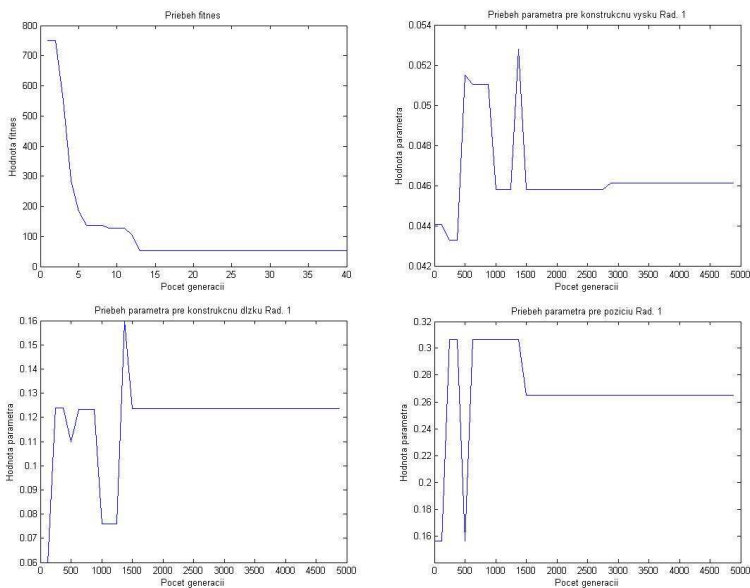
Počet generácií

Simulácie je obdobne ako v prípade kalibrácie časovo náročná (aj na výkonnej jednoprocessorovej viacjadrovej stanici, preto sme využili **viacprocesorovú** stanicu HeavyHorse). Vo všeobecnosti máme dve možnosti voľby ukončovacích podmienok. Pri prvej sa ukončí GA v prípade dosiahnutia predpísanej presnosti (kvality riešenia) a v druhom prípade pri dosiahnutí predpísaného počtu generácií (5000). V prípade, že po dosiahnutí predpísaného počtu generácií presnosť nie je uspokojivá, môžeme spustiť GA znovu pričom štartovná populácia bude nastavená ako populácia poslednej generácie predchádzajúceho GA.

Najlepší jedinec - riešenie

Najlepší jedinec, t.j. najlepšie riešenie na konci poslednej generácie reprezentuje kombináciu rozmerov radiátorov a ich umiestnení. Toto riešenie je spolu s reálne navrhnutým riešením zobrazené v tabuľke 10.2.

Na obr. 10.1 je znázornený priebeh fitness v priebehu jednotlivých generácií, variovanie jednotlivých parametrov pre jednotlivé radiátory ako aj pre samotné umiestnenie radiátora.



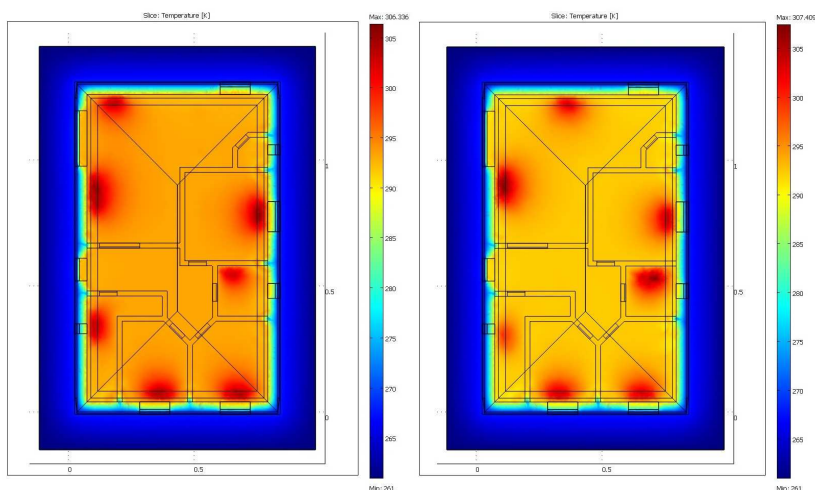
Obr. 10.1 GA VarA - Priebeh fitness (vľavo hore), priebeh parametra konštrukčnej výšky (vľavo hore), priebeh parametra konštrukčnej dĺžky (vľavo dolu), priebeh parametra umiestnenia Rad1 (vľavo dolu)

Tab. 10.2 Porovnanie reálneho a novo navrhnutého riešenia Var A

	GA Variant A				Reálne riešenie			
	typ	výška	dĺžka	pozícia	typ	výška	dĺžka	pozícia
Rad. 1	22K	50	60	0.265	21K	60	80	0.3
Rad. 2	33K	60	100	0.846	22K	60	130	0.8
Rad. 3	22K	60	60	0.336	22K	60	60	0.15
Rad. 4	22K	60	80	0.725	22K	60	90	0.74
Rad. 5	33K	50	70	0.657	22K	60	70	0.61
Rad. 6	22K	60	80	0.289	22K	60	90	0.32
Rad. 7	22K	60	80	0.618	22K	60	90	0.63

Najlepšie riešenie

Simulácia najlepšieho riešenia, ktoré bolo nájdené GA Var A je znázornené na obr. 10.2.



Obr. 10.2 Vykurovací systém navrhnutý GA – VarA (vľavo), reálne riešenie (vpravo)

Zhodnotenie riešenia variant A

Kvalitatívne sú obe riešenia veľmi podobné. Ako je vidieť z obr. 10.3 rozloženie teplôt sa veľmi **nelíši**, pričom riešenie vykazuje mierne horšie výsledky z hľadiska homogenity teplôt v miestnostiach aj keď toto hľadisko nebolo uvažované v rámci hodnotiacej funkcie. Je to spôsobené tým, že uvedený variant genetického algoritmu bol zameraný len na návrh vykurovacieho systému pri minimálnych rozmeroch s rešpektovaním predpísaného teplotného kritéria. Hodnota fitness najlepšieho riešenia GA bola **52,336** pričom ak vyhodnotíme rovnakým spôsobom reálne riešenie dostaneme hodnoty **49,767**. Je zrejme, že podľa pevne zvoleného kritéria dosiahnutia teplôt v miestnosti je z tohto pohľadu reálne riešenie predimenzované, čo však neznamená, že nie je dobré, pretože s otázkou komfortu sa budeme zaoberať až v ďalšom variante.

10.2 Variant B - Kritérium dosiahnutia predpísaných teplôt a zvoleného komfortu

Reťazec

Rovnako ako v predchádzajúcom prípade, v dome je 7 vykurovacích telies. Za dodržaní všetkých predpokladov ako vo variante A rozšírime dĺžku reťazca o 7, ktoré budú reprezentovať teploty radiátorov. Celkovo teda bude reťazec zložený z 35 génov, 21 reprezentuje konštrukčné vlastnosti radiátorov, 7 ich umiestnenie a 7 ich teploty. Rozsahy hodnôt prívych 28 génov zostanú rovnaké ako v predchádzajúcom GA. Rozsahy génov teplôt sú dané ako

$$R_T = \langle \alpha_T \cdot \theta_{k \max}; \theta_{k \max} \rangle \quad (10.2)$$

Fitness

Fitness funkcia je v tomto prípade dvojzložková. Prvá a druhá zložka definuje dosiahnutie predpísanej teploty (ako v prvej variante), tretia zložka reprezentuje dosiahnutie čo najlepšej tepelnej pohody. Táto zložka je vyjadrená ako absolútny rozdiel teplôt danej miestnosti od priemernej teploty miestnosti v hodnotených bodoch. Celkovo teda fitness i-teho jedinca môžeme vyjadriť ako

$$Fit(i) = \sum_{s=1}^m \left(\sum_{k=1}^{n(s)} b_u |\theta_s(k, s) - \theta_p(s)| + \beta \cdot \sum_{k=1}^{n(s)} b_o |\theta_s(k, s) - \theta_p(s)| + \gamma \cdot \sum_{k=1}^{n(s)} |\theta_s(k, s) - \theta_{avr}(s)| \right) \quad (10.3)$$

Vplyv parametrov β a γ na výsledok riešenia

Koeficienty β a γ určujú, ktorá zložka fitness bude viac dominovať. Pre väčšie hodnoty γ bude **významnejšia zložka komfortu** a naopak. Parameter α , ktorý sa vo fitness objavuje nepriamo, určuje interval rozsahu teplôt. So zväčšovaním tohto intervalu sa zväčšuje priestor pre riešenia, ktoré budú tvorené rozmernejšími vykurovacími telesami, čím by sme sa priblížili k LTH [21].

Voľba parametrov β a γ

Aby sme mohli tieto parametre zvoliť v rozumných medziach, musíme si najprv vyčíslieť hodnoty jednotlivých zložiek. Ak vyčíslime FF pre riešenie DD, potom

$$Fit = \sum_{s=1}^m \sum_{k=1}^{n(s)} b_u |\theta_s(k, s) - \theta_p(s)| = 19,774$$

$$Fit = \sum_{s=1}^m \sum_{k=1}^{n(s)} b_o |\theta_s(k, s) - \theta_p(s)| = 23,112$$

$$Fit = \sum_{s=1}^m \sum_{k=1}^{n(s)} |\theta_s(k, s) - \theta_{avr}(s)| = 32,119$$

VarB-a Variant s rovnako signifikantnými zložkami hodnotiacej funkcie

Populácia = 75, Generácií = 5000, **1: β :** $\gamma=1:1:1$

VarB-b Variant s dominantnou zložkou komfortu

Populácia = 75, Generácií = 5000, **1: β :** $\gamma=1:1:2$

Zhodnotenie riešenia variant B-a a B-b

Pre pripomenutie parametre účelovej funkcia GA variantu B-a boli nastavené ako $1:\beta:\gamma=1:1:1$ a variantu B-b ako $1:\beta:\gamma=1:1:2$, z čoho je zrejmé, že v druhom prípade bude ako lepšie posúdené riešenie, ktoré vykazuje lepšiu homogenitu teploty na úkor väčších rozmerov vykurovacích telies. Z obr. 10.4 a 10.6 je zrejmé, že v oboch variantoch sme dosiahli lepšiu úroveň tepelnej pohody v porovnaní s reálnym riešením. Keďže účelová funkcia je závislá od voľby parametrov $(\alpha_T, \beta, \gamma)$ nemôžeme posúdiť, ktoré z riešení B-a, B-b je lepšie, pretože každé reflektuje práve tie ciele, ktoré sme určili práve pomocou týchto parametrov. Preto sa v rámci posúdenia kvality riešenia prejaví subjektívny pohľad, resp. či užívateľ (investor) preferuje komfort na úkor rozmeru (aj ceny) vykurovacích telies. Zvyšovaním koeficientu β/α_T nastáva už spomenutá situácia, kedy je nastavená hodnotiacia funkcia v zmysle dosiahnutia maximálneho komfortu pri väčšom povolenom intervale prípustných teplôt vykurovacích telies.

10.3 Variant C – Kritérium dosiahnutia predpísaných teplôt podľa vonkajších podmienok

Úlohou tohto variantu GA je nájdenie optimálnej teploty vykurovacích telies podľa meniacich sa vonkajších podmienok (teplotných a poveternostných). Riešime 4 základné možné alternatívy, t.j. pre severné, južné, východné a západné prúdenie.

Modifikácia modelu

V predchádzajúcich prípadoch sme neuvažovali o vonkajšom prúdení vzduchu. Keďže oblasť okolia domu bola nastavená ako aktívna, stačí zmeniť v každej variante len oblasť pre inlet a outlet (t.j. vstupné a výstupné oblasti pre prúdenie)

Tab. 10.5 Nájdené teploty vykurovacích telies jednotlivými variantmi GA - VarC (v stup. K)

	Var C-a	Var C-b	Var C-c	Var C-d
Rad. 1	325,33	330,88	335,54	329,17
Rad. 2	332,42	335,92	336,74	331,88
Rad. 3	329,21	338,01	337,32	334,34
Rad. 4	330,47	329,18	330,01	335,55
Rad. 5	334,65	332,16	332,90	336,16
Rad. 6	333,35	326,08	332,67	332,98
Rad. 7	337,23	331,12	334,17	335,91

Zhodnotenie riešenia variant C

V tejto stati sme vytvorili genetický algoritmus hľadajúci optimálne hodnoty teplôt prvkov vykurovacej sústavy (v našom prípade zloženej zo siedmich radiátorov). GA bol vždy modifikovaný podľa sledovaného prúdenia. Podľa výsledkov (tab. 10.5) je zrejmé, že najvyššie teploty radiátorov sú vždy na náveternej strane a naopak teploty radiátorov záveternej strany sú nižšie. Takýmto spôsobom môžeme vykonať sériu experimentov v rôznych pracovných bodoch (rôznych hodnotách vonkajšej teploty, smeru a intenzity vetra a pod.), pomocou ktorých môžeme vytvoriť sieť riešení a vhodnou interpolačnou metódou vyplníme chýbajúce miesta v sieti. Takto môžeme vytvoriť mapu riadenia.

Zhodnotenie

Táto ťažisková kapitola dizertačnej práce zahŕňa vytvorenie jednotlivých variantov genetického algoritmu, ktoré sa líšia ako množinou optimalizovaných parametrov, veľkosťou prehľadávaného priestoru tak aj predpisom účelovej funkcie, ktorá vždy reflektuje sledovaný cieľ. Celkovo bolo vytvorených 7 rôznych variant GA, resp. 7 riešení v rámci návrhu, optimalizácie a riadenia vykurovacieho systému. Variant A rieši úlohu návrhu systému vykurovania bez zvýšenej pozornosti na komfort. Varianty B-a a B-b zohľadňujú aj práve zmienené hľadisko. Variant C rieši otázku nastavenia (riadenia) teplôt prvkov vykurovacej sústavy v závislosti od vonkajších podmienok. Každé riešenie je porovnané s reálnym riešením vykurovacieho systému (RRVS). Var A vykazuje v porovnaní s RRVS kompaktnéjšie rozmery vykurovacích telies avšak nižšiu tepelnú pohodu. Obe riešenia Var B sú v porovnaní s RRVS kvalitnejšie z pohľadu tepelnej pohody.

11 DISKUSIA K VÝSLEDKOM

Dosiahnuté výsledky môžeme rozdeliť podľa jednotlivých oblastí od tvorby 3D modelu až k riešeniam genetického algoritmu. Tieto výsledky sme porovnali či už s výsledkami podobných prístupov dosiahnutých vo svete ako aj s reálnymi riešeniami.

3D model

Vytvorený 3D model jednopodlažného rodinného domu (8) s použitím zvoleného CAD nástroja **CATIA V5** (3.3.1) reprezentuje všetky dôležité štruktúrne prvky z pohľadu stanoveného cieľa, t.j. simulácie tepelných dejov. Model sa skladá z **13 samostatných prvkov (Body)**, t.j. kvalitatívne rôznych objektov, čo je veľmi dôležité pre použitie tohto modelu v simulačných softvéroch, najmä z hľadiska **selektovania štruktúrnych prvkov** [22].

Matematicko-fyzikálne modelovanie a počítačové simulácie

Výsledky zostavenej simulácie v Comsol Multiphysics 3.5a vykazovali rozdiel voči reálnym dátam **max. 2,5 °C** (t.j. pri verifikácii). Modifikáciou fyzikálnych veličín štruktúrnych parametrov pomocou genetického algoritmu [23] sa tento rozdiel znížil na 0,6 °C. Verifikácie v nových pracovných bodoch vykazovali max. rozdiely **0,5 °C a 0,4 °C**, čo je postačujúce z hľadiska návrhu a optimalizácie vykurovacieho procesu. V porovnaní s [24] je zvolená metóda kalibrácie výhodná a upravený model simulácie vykazuje dostatočne presné výsledky. Metóda matematicko-fyzikálneho modelovania, voľba typu a vlastností FEM siete ako aj samotného riešiča (9.4) bola zvolená správne s rešpektovaním všetkých podmienok a kritérií. Simulácia jedného riešenia (9.4) trvá rádovo sekundy (desiatky sekúnd) čo je v porovnaní s inými softvérmi (riešeniami, napr. [25]) oveľa viac, preto je dôležité správne zvoliť typ FEM siete a aj typ riešiča. Pre zvolený typ úloh je riešič **Direct (PARADISO)** najrýchlejší. Kalibračný proces na danom PC pri konfigurácii 1000 generácií a 50 prvkovej populácií trval 51 hodín. (*Intel Core 2 Quad Q9550 2,83 MHz 12 M, 8 GM RAM 1600 MHz Corsair, OS: Win XP x64*)

Vykurovací systém – optimalizácia pomocou GA

Variant A genetického algoritmu našiel optimálny návrh (rozmery a umiestnenie) vykurovacieho systému podľa kritéria dosiahnutia predpísanej teploty v miestnosti. Kvalitatívne je toto riešenie v porovnaní s reálom veľmi podobné. Ako je vidieť z obr. 10.3 rozloženie teplôt sa veľmi **nelíši**, pričom riešenie vykazuje mierne horšie výsledky z hľadiska homogenity teplôt v miestnostiach. Hodnota fitness najlepšieho riešenia GA bola **52,336** pričom ak vyhodnotíme rovnakým spôsobom reálne riešenie dostaneme hodnoty **49,767**. Je zrejme, že podľa pevne zvoleného kritéria dosiahnutia teplôt v miestnosti je z tohto pohľadu reálne riešenie predimenzované.

Varianty B-a a B-b našli optimálny návrh (rozmery, umiestnenie a teploty) vykurovacieho systému podľa kritéria dosiahnutia predpísanej teploty a tepelnej pohody v miestnosti. Trojzložková účelová funkcia (dosiahnutie teploty, prekročenie teploty, homogénnosť teplôt) má dva stupne voľnosti β a γ . Parametre účelovej funkcia GA variantu B-a boli nastavené ako $1:\beta:\gamma=1:1:1$ a variantu B-b ako $1:\beta:\gamma=1:1:2$, z čoho je zrejme, že v druhom prípade bude ako lepšie posúdené riešenie, ktoré vykazuje lepšiu homogenitu teploty na úkor väčších rozmerov vykurovacích telies. Z obr. 10.4 a 10.6 je zrejme, že v oboch variantoch sme dosiahli **lepšiu úroveň tepelnej pohody** v porovnaní s reálnym riešením. Keďže účelová funkcia je závislá od voľby parametrov $(\alpha_T, \beta, \gamma)$ nemôžeme posúdiť, ktoré z riešení B-a, B-b je lepšie, pretože každé reflektuje tie ciele, ktoré sme určili práve pomocou týchto parametrov. Preto sa v rámci posúdenia kvality riešenia prejaví subjektívny pohľad, resp. či užívateľ (investor) preferuje komfort na úkor rozmeru (aj ceny) vykurovacích telies. Zvyšovaním koeficientu β/α_T nastáva už spomenutá situácia, kedy je nastavená hodnotiacia funkcia v zmysle dosiahnutia maximálneho komfortu pri väčšom povolenom intervale prípustných teplôt vykurovacích telies.

Variant C genetického algoritmu hľadal optimálne hodnoty teplôt prvkov vykurovacej sústavy (v našom prípade zloženej zo siedmich radiátorov). GA bol vždy modifikovaný podľa sledovaného prúdenia. Podľa výsledkov (tab. 10.5) je zrejme, že **najvyššie teploty radiátorov sú vždy na náveternej strane** a naopak teploty radiátorov **záveternej strany sú nižšie**. Takýmto spôsobom môžeme vykonať sériu experimentov v rôznych pracovných bodoch, pomocou ktorých môžeme vytvoriť sieť riešení a vhodnou interpolačnou metódou vyplníme chýbajúce miesta v sieti. Takto je možné vytvoriť „mapu“ riadenia.

Podľa grafov zobrazujúcich priebeh fitness jednotlivých variantov GA je zrejme, že parametre GA boli vhodne nastavené ([20], [26]) pričom bola dosiahnutá potrebná konvergencia aj diverzita populácie. Dlhý čas behu GA je možné eliminovať použitím výpočtového clusteru alebo paralelným GA [27].

Navrhnuté systémy vykurovania v porovnaní s reálnym riešením ([28], [29]) vykazujú vždy lepšie výsledky v rámci zvolených kritérií, t.j. či už v rámci kompaktnosti rozmerov, alebo dosiahnutia tepelnej pohody. Výsledky variantu C nie je možné objektívne porovnať s konvenčnými metódami riadenia, pretože sú principiálne odlišné, resp. nezahŕňajú taký veľký počet riadiacich parametrov.

12 PRÍNOSY A ZÁVER DIZERTAČNEJ PRÁCE

Pri riešení dizertačnej práce s názvom "Inteligentné budovy, modelovanie – podpora pri projektovaní" je možné dosiahnuté výsledky zhrnúť s dôrazom na ich uplatnenie ako v oblasti rozvoja vedy, tak i v spoločenskej praxe.

12.1 Prínosy pre ďalší rozvoj vedy

V práci je definovaný nový prístup k návrhu vykurovacieho subsystému rodinného domu pomocou evolučných metód, resp. pomocou genetického algoritmu, ktorého úlohou je nájdenie optimálnej kombinácie konštrukčných parametrov vykurovacích telies, ich teplôt a umiestnenia.

12.1.1 Analýza súčasného stavu problematiky

K zlepšeniu orientácie projektantov v oblasti návrhu nielen systémov vykurovania pre segment rodinných domov prispieva analýza súčasného stavu problematiky IB.

- Štúdia možností komunikácie a prenosu informácií v IB, energetickej náročnosti, možností riadenia, automatizácie budov, technických systémov, správy a hospodárenia v rámci IB.
- Výsledkom analýzy je prezentácia progresívneho trendu, ktorým sa ubera výskum a vývoj v oblasti návrhu riadiacich systémov a návrhu zariadení techniky prostredia IB.

12.1.2 Matematicko-fyzikálne modelovanie a počítačové simulácie

Pre účely matematicko-fyzikálneho modelovania a počítačovej simulácie boli analyzované vybrané softvérové prostriedky z hľadiska sledovaného cieľa.

- Štúdia výhod a obmedzení softvérových prostriedkov z hľadiska vytvorenia modelu, následného importu do simulačného softvéru ako aj softvéru (prostredia) pre tvorbu zdrojového kódu genetického algoritmu.
- Výsledkom analýzy sú základné funkčné požiadavky na programové nástroje pre vytvorenie 3D modelu, simulácie tepelných dejov a vytvorenia algoritmu pre optimalizáciu tohto procesu s dôrazom kompatibility koncových riešení jednotlivých softvérov.

12.1.3 Evolučné výpočty

Možnosti aplikácie evolučných techník v oblasti návrhu alebo optimalizácie subsystémov budovy.

- Charakteristika genetických algoritmov, ich možností a obmedzení pre oblasť syntézy a optimalizácie vykurovacieho systému budovy.
- Definovanie hodnotiacich funkcií podľa rôznych kritérií.
- Analýza vplyvu základných parametrov genetického algoritmu na kvalitu riešenia a konvergenciu, tj. vplyv váhovacích koeficientov, veľkosti populácie, počtu generácií na kvalitu riešenia a samotnú konvergenciu algoritmu.

12.1.4 Vykurovací systém – optimalizácia pomocou GA

Zostavenie a popis novej metodiky návrhu a optimalizácie vykurovacieho systému pomocou genetického algoritmu.

- Charakteristika základných predpokladov pre dosiahnutie vierohodných výsledkov
- Prednosti a obmedzenia kalibrácie modelu pomocou evolučných techník
- Analýza možností GA v rámci návrhu a optimalizácie vykurovacieho systému
- Porovnanie riešení podľa klasického prístupu a výsledkov GA

12.2 Prínosy pre technickú prax

Praktické výstupy pri sledovaní systémového celku vykurovania a aplikácie evolučných metód možno zhrnúť ako prínosy pre technickú prax.

12.2.1 Analýza súčasného stavu problematiky

Sektor komunikačných, riadiacich a podporných systémov sa v posledných rokoch výrazne vyvíja. Ide o pomerne zložitú, technicky špecializovanú oblasť, ktorá nie je bežne celkom známa. Preto je treba si uvedomiť dôležitosť správneho zadania projektu (a samozrejme dodržanie tohto projektu), pričom kvalita tohto projektu ovplyvní výskyt problémov v budúcich etapách realizácie a prevádzky objektu.

12.2.2 Matematicko-fyzikálne modelovanie a počítačové simulácie

Z hľadiska simulácie tepelných procesov, prestupov tepla, vzniku tepelných prúdov a pod. sa javí najlepšie použitie softvéru Comsol Multiphysics, pretože v jednom kroku sme schopný riešiť úlohu z rôznych fyzikálnych aspektov (čo sa javí ako výhodné - šírenie tepla, tepelné prúdy a pod.). Výhodou tohto softvéru je aj jeho široká kompatibilita s inými existujúcimi programovými balíkmi (import modelu z soft. CATIA V5 a prepojenie s Matlab-om). Pričom vo všeobecnosti platí:

- Prínosy dosiahnuté aplikáciou simulácie by mali byť väčšie ako náklady potrebné na realizáciu simulácie a zlepšení v systéme. Rozhodujúcim kritériom pre to, aby simulácia mohla byť v praxi využitá, bude prínos z jej využitia. Prínosy môžeme rozdeliť na kvantitatívne a kvalitatívne. Pri rozhodovaní o simulačnom projekte bude platiť jednoduché pravidlo: simulácia bude opodstatnená v prípade, ak sú priame prínosy zo simulácie väčšie ako náklady na simuláciu. V mnohých prípadoch nie je cieľom simulácie priamy ekonomický efekt. Dodávateľ výrobných alebo dopravných systémov môže s pomocou simulácie, napríklad, dokazovať ich funkčnosť, výkon alebo spoľahlivosť, čo môže zlepšiť jeho pozíciu na trhu. Na to, aby bol efekt simulácie maximálny, do značnej miery vplýva čas, kedy je simulácia realizovaná.
- Simulácia by mala byť použitá už v počiatočných fázach spracovania projektu. V procese realizácie a prevádzky zostáva už len málo stupňov voľnosti pre zmeny a zlepšovanie a väčšina takýchto zlepšení je spojená s vysokými dodatočnými nákladmi, ktoré niekedy môžu prevyšovať prínosy zo zlepšenia.

3D model vytvoreného domu predstavuje základnú koncepciu reprezentácie objektu pre ciele tepelných simulácií. Definuje základné štruktúrne prvky, ktoré treba zahrnúť do modelovania z pohľadu šírenia tepla a vzniku tepelných prúdov.

12.2.3 Evolučné výpočty

Simulácia tepelných procesov vo vytvorenom modeli tvorí silnú pomôcku projektanta, či už z pohľadu návrhu alebo optimalizácie, ako aj z pohľadu riadenia teploty. Projektant si môže overiť vhodnosť svojho riešenia, porovnať ho s výsledkami počítačového riešenia, poprípade čiastočne optimalizovať svoje riešenie. Z pohľadu riadenia sa pomocou simulácie môže zostaviť mapa riadenia pre rôzne pracovné body.

12.2.4 Vykurovací systém – optimalizácia pomocou GA

Algoritmy pre návrh, optimalizáciu a aj riadenie vykurovacieho systému nebol implementovaný z hľadiska vytvorenia softvérového nástroja ako podpory pre projektanta. Preto sú možnosti takto zostavených algoritmov limitované z dôvodu absencie GUI a všeobecného poňatia riešenia problému. T.j. projektant sa musí naučiť celú metodiku tvorby modelu a simulácie.

12.3 Splnenie vytýčených cieľov dizertačnej práce

Cieľ. č. 1

Analýza klasického prístupu pre návrh systému vykurovania segmentu rodinných domov, podľa STN EN 12 831 (STN 73 0540)

Tento cieľ bol analyticky spracovaný v kapitole 6, presnejšie v častiach 6.2 až 6.5. Okrem základného prehľadu metodiky uvedených noriem sme popísali problematiku tejto oblasti v kapitole 6.1 ako aj princípy tepelných dejov kap. 5 a charakteristiku metódy konečných prvkov, ktorá sa používa ako výpočtová metóda tejto oblasti. Takto zostavená koncepcia podáva ucelený prehľad o potrebných faktoroch, ktoré treba uvažovať pri návrhu systému vykurovania, ktoré využije ako stavebný tak aj elektrotechnický inžinier.

Cieľ. č. 2

Analýza možností tvorby 3D modelu z pohľadu následnej simulácie (šírenie tepla). Vytvorenie 3D modelu jednoduchého bytu, rodinného domu alebo malej budovy

Kapitola 8 je venovaná práve tomuto cieľu. V úvode tejto state definujeme základné požiadavky, ktoré musí spĺňať vytvorený model z pohľadu využitia pri simulácii tepelných dejov. Stručným popisom tvorby jedného segmentu modelu sú načrtnuté možnosti a obmedzenia použitého CAD nástroja, ktorý je bližšie opísaný v kapitole 3.3.1

Cieľ. č. 3

Nastavenie parametrov simulácie zodpovedajúce vytvorenému 3D modelu (podľa zvolených požiadaviek), kalibrácia a verifikácia modelu

Zostavenie simulácie s využitím vytvoreného 3D modelu, jeho následná verifikácia, kalibrácia a analýza vierohodnosti výsledkov v závislosti od kvalitatívnej a kvantitatívnej voľby prvkov modelu je analyzovaná v kapitole 9.

Cieľ. č. 4

Vytvorenie genetického algoritmu, zahŕňajúceho signifikantné parametre z pohľadu užívateľa a sledovaného cieľa. Príprava a realizácia experimentu (niekoľko experimentov). Overenie funkčnosti modelu a nájdenie konkrétnych riešení pre zvolené modely

Základné poznatky z oblasti evolučných techník a podrobnejší popis genetických algoritmov je uvedený v kapitole 4. Implementácia genetických algoritmov, analýza možností alternatív účelovej funkcie, vplyvov jej parametrov na výsledné riešenie je obsiahnutá v kapitole 9.

Cieľ. č. 5

V porovnaní s už existujúcim riešením porovnať efektívnosť novo navrhnutého riešenia. Na základe vyhodnotenia experimentov posúdiť možnosti vytvorenia softvérového nástroja pre podporu inžiniera pri návrhu subsystémov budovy

V kapitole 9 sme podrobne popísali všetky alternatívy vytvoreného riešenia. V stati 10.5 sú popísané možnosti tohto prístupu (algoritmu) pre ďalší vývoj aj použitie ako podporný nástroj inžiniera. Novo navrhnutý prístup ponúka širokú škálu možností pre ďalšie rozšírenie, či už z pohľadu nových konštrukčných prvkov, sledovaných veličín ako aj rôznych kritérií.

Cieľ č. 6

Vyhodnotiť celkový prínos použitého prístupu, možnosti modifikácie pre budúcnosť.

Tento bod zadania je analyzovaný v kap. 10.5, 12.1 a 12.2, podľa ktorých môžeme posúdiť, že práca je prínosom ako pre vedu, tak aj pre prax pričom navrhnutá metodika optimalizácie a návrhu systému vykurovania má veľký potenciál pre ďalší rozvoj. Celkovo môžeme zhrnúť výhody a nevýhody zvoleného prínosu ako:

Výhody

- nájdenie optimálneho riešenia podľa zvoleného kritéria
- jednoduchá modifikácia hodnotiacej funkcie
- sledovanie viacerých fyzikálnych veličín, ich súbežné riešenie v jednom modeli
- relatívne jednoduchá rozšíriteľnosť modelu o ďalšie aplikačné režimy (oblasti)
- pri novom riešení sa jadro GA takmer nemení
- analogické použitie metodiky v iných oblastiach návrhu a optimalizácie

Nevýhody

- nutnosť použitia špecializovaného softvéru pre tvorbu zložitejšieho 3D modelu
- nutnosť verifikácie a kalibrácie
- nastavenie parametrov simulácie je jedinečné pre každé riešenie
- dlhý čas výpočtu, vysoké hardvérové požiadavky
- cena použitých softvérov

Modifikácie pre ďalšie rozpracovanie

Rozšírenie skupiny optimalizovaných parametrov aj o parametre z iných oblastí domu. Napr. sa môžu zahrnúť parametre charakterizujúce stavebnú konštrukciu a aj parametre reprezentujúce typ, veľkosť a určenie miestností. S rozšírením skupiny parametrov sa ponúkajú ďalšie možnosti v smere zostavenia fitness. Účelová funkcia potom môže posudzovať kvalitu riešenia napr. z pohľadu optimálnej voľby stavebných materiálov (cena, vlastnosti atď.), voľby typu a vlastností vykurovacieho systému (komponenty, umiestnenie, cena atď.). Výsledkom takto definovanej úlohy bude optimálny návrh domu z pohľadu ekonomického (či už z pohľadu investičných a prevádzkových nákladov v závislosti), pohľadu komfortu alebo iného kritéria.

Jednou z hlavných nevýhod uvedeného prístupu je veľký výpočtový čas. Tento nedostatok, by sa dal eliminovať použitím viacerých počítačov, resp. vytvorením clusteru počítačov špecializovaných pre túto úlohu. Žiaľ v súčasnosti nie je možné využiť túto možnosť. Parallel toolbox Matlabu síce tento problém rieši, ale súčasná verzia Comsolu 3.5a nepodporuje tento toolbox, resp. nie je možné spustenie simulácie cez Matlab Parallel toolbox. Podľa najnovších informácií o novej verzii Comsolu, ver. 4, by mal byť tento nedostatok eliminovaný. Preto stojí za zmienku ďalšia úvaha o použití výpočtového clusteru pre genetický algoritmus poprípade paralelný genetický algoritmus.

Jednou z možných alternatív pre rozvinutie opísaného prístupu (riešenia) je vytvorenie kompaktniejšieho programu (užívateľského rozhrania) v rámci vytvorenia nástroja ako podpory pre projektanta. Takto vytvorené GUI by malo byť schopné ponúknuť užívateľovi možnosť vytvorenia (alebo importu) modelu, zadania a nastavenia parametrov simulácie ako aj jednoduché zostavenie samotného algoritmu optimalizácie. Projektant by rovnako mal mať možnosť určenia účelovej funkcie a jej charakteristik.

12.4 Záver

„Inteligentné budovy“ sa v súčasnosti stavajú nielen ako veľké administratívne budovy, ale už aj našli svoje miesto aj v segmente rodinných domov. Náklady na prevádzku budov, hrajú významnú rolu už pri samotnom procese projektovania (energetická certifikácia), preto je dôležité stavať budovy s čo možno najnižšími požiadavkami na zdroje a s čo možno najnižšími dopadmi na životné prostredie. Z tohto hľadiska je veľmi dôležité mať k dispozícii čo možno najviac informácií zo štúdií a simulácií ešte pred začatím realizácie projektu.

Podľa prehľadu tepelných dejov, typov vykurovania a samotnej metodiky pre návrh vykurovacieho systému je zrejmé, že jeho návrh z hľadiska stanovených podmienok, typu vykurovania a optimálnosti nie je vôbec triviálny. Spotreba energií určenej na vykurovanie a chladenie je rovná približne 60 % z celkovej spotrebovanej energie budovy, preto si táto oblasť zaslúži čo najväčšiu pozornosť, či už z hľadiska úspor alebo možností softvérových možností ako podpory pre túto oblasť.

Rôzne simulačné softvéry nám umožňujú simulovať fyzikálne, ekonomické, ekologické, sociálne a rôzne iné procesy v rámci rôznych modelov reálneho sveta, ktoré sa líšia či už

vnútornou reprezentáciou ako aj samotným účelom v rámci sledovaného cieľa. Každú simuláciu môžeme chápať ako samostatný projekt s využitím zásad riadenia projektov. Znamená to definovať úlohy, navrhnuť ich logickú a časovú nadväznosť, určiť potrebné ľudské a výpočtové zdroje, finančné nároky a dobu úhrady vložených prostriedkov. Z pohľadu simulácie tepelných procesov, prestupov tepla, vzniku tepelných prúdov a pod. sa javí najlepšie použitie softvéru Comsol Multiphysics a jeho prepojenie s Matlab-om, v ktorom je možná jednoduchá tvorba genetického algoritmu.

Genetický algoritmus je univerzálna optimalizačná metóda (v rámci evolučných techník), ktorá je schopná relatívne jednoducho riešiť aj otázku návrhu a optimalizácie vykurovacieho systému.

Na výsledky simulácie tepelných dejov má dôležitý vplyv procedúra nastavenia parametrov a počiatočných podmienok pred spustením simulácie ako aj možnosti voľby riešičov a vlastností FEM siete. Zistený nesúlad (model – realita) je možné eliminovať kalibráciou modelu pomocou genetického algoritmu a následnou verifikáciou v nových pracovných bodoch.

Genetickým algoritmom boli nájdené rôzne konštrukčné návrhy vykurovacieho systému domu ako aj teplôt pre jednotlivé vykurovacie telesá. Pri kritériu najmenších rozmerov je nájdené riešenie kompaktnjšie na úkor tepelnej pohody (v porovnaní s reálnym riešením). Pri zdôrazňovaní hľadiska tepelnej pohody sa zväčšujú rozmery vykurovacích telies a ich teplota sa znižuje, čo ukázali riešenia GA s kritériálnou funkciou zameranou na komfort.

Na záver tejto dizertačnej práce môžeme s istotou konštatovať, že zvolený prístup (procedúra genetického algoritmu s využitím prepojenia softvérových zvolených prostriedkov) je schopný kvalitne navrhnuť systém vykurovania rodinného domu pri splnení predpísaného kritéria komfortu.

LITERATÚRA

- [1] VAREŠ M.: *Inteligentní dům*, Era, 2006, Praha, Česká Republika
- [2] ŠTEVO S.: *Projektovanie IB s využitím VR*, Dipl. práca, FEI STU, 2006, Bratislava, str. 16
- [3] SRDEČNÝ K.: *Energeticky soběstačný dům - realita, či fikce?* Era, 2006, Praha, Česká Rep.
- [4] BUDIÁKOVÁ M.: *Energeticky úsporné budovy*, A-Projekt, 2003, Bratislava
- [5] ŽÁRA J.: *VRML 97*, Computer Press, 1999 Brno
- [6] HARTMAN J., WERNECKE J.: *VRML 2.0 Handbook, The: Building Moving Worlds on the Web, Silicon Graphics*, 1999 Addison-Wesley Professional
- [7] Simulační prostředí TRNSYS: <http://www.tzb-info.cz/ty.py?t=2&i=1956> (TZB-info), <http://www.trnsys.com/about.htm>
- [8] Energy System Research Unit: <http://www.esru.strath.ac.uk/> (Department of Mechanical Engineering at the University of Strathclyde)
- [9] ŠTEVO S.: *Catia V5*, www.spoterus.sk, 2009, ISSN 1338-0087
- [10] ŠTEVO S.: *Energetika budov a počítačové modelovanie*. In: Facility Management 2007 : Zborník prednášok z 5.konferencie so zahraničnou účasťou./SR, Bratislava : Slovenská spoločnosť pre techniku prostredia, sep. 2007. - ISBN 978-80-89216-15-4. - CD-Rom
- [11] FOLTIN. M: *Matlab*, www.spoterus.sk, 2009, ISSN 1338-0087
- [12] LAŽANSKÝ J. MAŘÍK V., ŠTĚPÁNKOVÁ O. A KOL., : *Umělá inteligence (3)*, Academia, AV ČR, Praha 2001, str. 120

- [13] SEKAJ I. , *Evolučné výpočty a ich využitie v praxi*, IRIS, 2005, Bratislava
- [14] KVASNÍČKA V., POSPÍCHAL J., TIŇO P.: *Evolučné algoritmy*, Vydavateľstvo STU, 2000, Bratislava,
- [15] LAŽANSKÝ J. MAŘÍK V. ,ŠTĚPÁNKOVÁ O. A KOL. : *Umělá inteligence (4)*, Academia, AV ČR, 2003 Praha, Česká Republika, str. 143
- [16] TEPLÍČKA I.: *Fyzika*, Enigma, 2007, Bratislava
- [17] KOCHANÍK J. , VOJTKO I. : *Metóda konečných prvkov v teórii a príkladoch*, FvT, 2007, Košice
- [18] DANIELS K. , *Technika budov*, Jaga, 2005, Bratislava
- [19] Comsol: FEMLAB 3, *Heat Transfer Module, Model Library*, Comsol AB., 2004
- [20] ORAVEC M.: *Evolučné výpočtové metódy*, Diploma Thesis, URPI FEI STU, Bratislava, 2007
- [21] BABIAK J., OLESEN B., PETRÁŠ D.: *Low temperature heating and high temperature cooling*, 2009
- [22] HAITAO YU, NASSERI R.: *Process flowcharting and simulation of house structure components production process*, In Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference, NY, USA
- [23] ŠLEZÁROVÁ A., ŠTEVO S.: *Heating system of building calibration by genetic algorithm*, ELITECH `09 : 11th Conference of Doctoral Students, 2009, FEI STU, Bratislava
- [24] CARRILO A., CEJUDO M. J., F. DOMINGUEZ: *Calibration of an energyplus simulation model by the stempstar method*, Eleventh International IBPSA Conference, July 27-30 2009, Glasgow, Scotland
- [25] BOTHA C. P.: *Simulation of a building heating, ventilating and air-conditioning system*, 2000, UoP, Pretoria, Australia
- [26] EIBEN A.E., HINTERDING R. , MICHALEWICZ Z.: *Parameter control in evolutionary algorithms*, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1999
- [27] ORAVEC M., ŠTEVO S., SEKAJ I.: *Comparision of using simple genetic algorithm and parallel genetic algorithm in heat transfer model optimization*, In SSKI conference of Cybernetics and Informatics 2010, Vyšná Boca, Slovakia

ZOZNAM PUBLIKOVANÝCH PRÁČ

ŠTEVO, STANISLAV: *Optimalizácia vykurovania podľa vonkajších podmienok*, Technical Computing Prague 2009 : 17th Annual Conference Proceedings. Prague, Czech Republic, 19.12.2009. - Praha : Humusoft s.r.o, 2008. - ISBN 978-80-7080-692-0. - CD-Rom

MICHÁLEK, SVETOZÁR - ŠTEVO, STANISLAV - FARKAS, GABRIEL - HAŠČÍK, JÁN: *CNP5 Calculations and Genetic Algorithm for Delayed Neutron Fraction Determination*. In: CMAS 2009. Computational Modelling and Advanced Simulations : International Conference. Bratislava, Slovak Republic, 30.6.- 3.7.2009. - Bratislava : STU v Bratislave FEI, 2009. - ISBN 978-80-227-3067-9. - CD-Rom

MICHÁLEK, SVETOZÁR - ŠTEVO, STANISLAV - FARKAS, GABRIEL - HAŠČÍK, JÁN: *Methods of Delayed Neutron Fraction (β_{eff}) Determination in Training Reactor VR-1*. In: ELITECH `09 : 11th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 25.5.2009. - Bratislava : STU v Bratislave FEI, 2009. - ISBN 978-80-227-3091-4. - CD-Rom

ŠTEVO, STANISLAV - ŠLEZÁROVÁ, ALEXANDRA: *Heat Transfer Model of Building Calibration by Genetic Algorithm*. In: ELITECH `09 : 11th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 25.5.2009. - Bratislava : STU v Bratislave FEI, 2009. - ISBN 978-80-227-3091-4. - CD-Rom

ŠTEVO, STANISLAV: *Komunikačné systémy v rámci verejnej bezpečnosti*. In: Environmentálne a bezpečnostné aspekty požiarov a havárií : Konferencia s medzinárodnou účasťou. Trnava, 12.2.2009. - Trnava : AlumniPress, 2009. - ISBN 978-80-8096-080-3. - CD-Rom

ŠTEVO, STANISLAV: *Optimalizácia vykurovania podľa vonkajších podmienok*. In: Facility management 2009 : Zborník prednášok zo 7.konferencie so zahraničnou účasťou. Bratislava, SR ,7.-8.10.2009. - Bratislava : Slovenská spoločnosť pre techniku prostredia, 2009. - ISBN 978-80-89216-28-4. - S. 57-60

ŠTEVO, STANISLAV: *Podpora pri projektovaní vykurovacieho systému*. In: Vykurovanie 2009. Alternatívne zdroje energie a systémy zásobovania budov teplom : Zborník prednášok zo 17. medzinárodnej konferencie. - Tatranské Matliare, 2.-6. 3. 2009. - Bratislava : Slovenská spoločnosť pre techniku prostredia, 2009. - ISBN 978-80-89216-27-7. - S. 463-468

MICHÁLEK, SVETOZÁR - ŠTEVO, STANISLAV - FARKAS, GABRIEL - HAŠČÍK, JÁN: *In-pile Kinetic Measurement and MCNP5 Calculation of Delayed Neutron Fraction in Training Reactor VR-1*. In: IYEC 2009 : 2nd International Youth Conference on Energetics. Budapest, Hungary, 4.6.- 6.6.2009. - Budapest, Hungary 2009. ISBN 978-963-420-983-6. - CD-Rom

ŠTEVO, STANISLAV: *Soběstačnost zajistí kombinace několika zdrojů*. In: Facility manager. - Roč. 1, č. 2 (2008), s. 5-6

ŠTEVO, STANISLAV: *Heating System Designed by Genetic Algorithm*. In: Mendel 2008 : 14th International Conference on Soft Computing, Brno, Czech Republic, 18.-20.6.2008. - Brno : Brno University of Technology, 2008. - ISBN 978-80-214-3675-6. - S. 71-77

ŠTEVO, STANISLAV: *Optimalizácia chodu robota pomocou evolučných metód*. In: Technical Computing Prague 2008 : 16th Annual Conference Proceedings. Prague, Czech Republic, 11.11.2008. - Praha : Humusoft s.r.o, 2008. - ISBN 978-80-7080-692-0. - CD-Rom

ŠTEVO, STANISLAV: *Energeticky nezávislý dom*. In: Vykurovanie 2008. Energetická efektívnosť zásobovania teplom : Zborník prednášok zo 16. medzinárodnej konferencie. - Tatranské Matliare, 3.-7.3. 2008. - Bratislava : Slovenská spoločnosť pre techniku prostredia, 2008. - ISBN 978-80-89216-19-2. - CD-Rom

ŠTEVO, STANISLAV: *Integrácia zabezpečovacích a protipožiarnych systémov*. In: Integrovaná bezpečnosť 2008. Integral Safety 2008 : Zborník príspevkov z medzinárodnej vedeckej konferencie. 12-13 May 2008, Staré Hory, Slovakia. - Trnava : AlumniPress, 2008. - ISBN 978-80-8096-056-8. - CD-Rom

ŠTEVO, STANISLAV: *Local Area Network Designed by Genetic Algorithm*. In: ELITECH '08 : PhD Students Conference. Bratislava, Slovak Republic, 20.5.2008. - Bratislava : STU v Bratislave, 2008. - ISBN 978-80-227-2878-2. - CD-Rom

ŠTEVO, STANISLAV: *Návrh vykurovacieho systému domu pomocou genetického algoritmu*. In: Inovácie 2008 : Zborník príspevkov. Trnava, 27.-28.5.2008. - Trnava : AlumniPress, 2008. - ISBN 978-80-8096-062-9. - CD-Rom

ŠTEVO, STANISLAV: *Optimalizácia vykurovacieho systému*. In: Facility Management 2008 : Zborník prednášok zo 6.konferencie so zahraničnou účasťou. SR, Bratislava, september 2008. - Bratislava : Slovenská spoločnosť pre techniku prostredia, 2008. - ISBN 978-80-89216-22-2. - S. 107-110

ŠTEVO, STANISLAV - JAKAB, ARPÁD: *Rozmiestňovanie prvkov slaboprúdových rozvodov*. In: Inovácie 2008 : Zborník príspevkov. Trnava, 27.-28.5.2008. - Trnava : AlumniPress, 2008. - ISBN 978-80-8096-062-9. - CD-Rom

ŠTEVO, STANISLAV - HANTUCH, IGOR, jnr.: *Využitie počítačového modelovania a simulácie pri požiarnej ochrane budov*. In: Environmentálne aspekty požiarov a havárií : Konferencia s medzinárodnou účasťou, Trnava, 7.2.2008. - Trnava : AlumniPress, 2008. - ISBN 978-80-8096-052-0. - CD-Rom

ŠTEVO, STANISLAV - HANTUCH, IGOR: *eRoom*. In: e-Arcom 07 : Sistemi Informativi per l'Architettura. Ancona, Italy, March 2007. - Firenze : Alinea Editrice, 2007. - ISBN 978-88-6055-135-1. - S. 313-314

ŠTEVO, STANISLAV - DUCHOŇ, MARTIN: *Building Energetic, Computer Modelling and Model Calibration*. In: CO-MAT-TECH 2007 : Proceedings of the 15th International Scientific Conference. Trnava, 18-19 October 2007. - Trnava : AlumniPress, 2007. - ISBN 978-80-8096-032-2. - CD-Rom

ŠTEVO, STANISLAV: *Electrically Independent House*. In: ELITECH '07. 9th Conference for PhD Students Electrical Engineering and Information Technology : Bratislava, Slovak Republic, 16.5.2007. - Bratislava : STU v Bratislave, 2007. - ISBN 978-80-227-2655-9. - CD-Rom

ŠTEVO, STANISLAV: *Energetika budov a počítačové modelovanie*. In: Facility Management 2007 : Zborník prednášok z 5.konferencie so zahraničnou účasťou./SR,Bratislava,september 2007. - Bratislava : Slovenská spoločnosť pre techniku prostredia, 2007. - ISBN 978-80-89216-15-4. - CD-Rom

ŠTEVO, STANISLAV - JURÍČEK, MICHAL - HANTUCH, IGOR: *Kalibrácia modelu virtuálnej budovy*. In: Facility Management 2007 : Zborník prednášok z 5.konferencie so zahraničnou účasťou./SR,Bratislava,september 2007. - Bratislava : Slovenská spoločnosť pre techniku prostredia, 2007. - ISBN 978-80-89216-15-4. - CD-Rom

ŠTEVO, STANISLAV: *Modelovanie vo virtuálnej realite - bezpečnosť budov*. In: Manažérstvo životného prostredia 2006 : Trnava 24.-25.2.2006. - Žilina : STRIX, 2006. - ISBN 80-89281-02-08. - CD-Rom

ŠTEVO, STANISLAV: *Virtuálna realita a 3D projekcia*. In: Manažérstvo životného prostredia 2006 : Trnava 24.-25.2.2006. - Žilina : STRIX, 2006. - ISBN 80-89281-02-08. - CD-Rom

JURÍČEK, MICHAL - ŠTEVO, STANISLAV - HANTUCH, Igor: *Informačné technológie versus inteligentné budovy*. In: Facility Management 2006 : Zborník prednášok zo 4.konferencie so zahraničnou účasťou. Bratislava,september 2006. - Bratislava : Slovenská spoločnosť pre techniku prostredia, 2006. - ISBN 80-89216-09-9. - S. 127-128

ŠTEVO, STANISLAV - JURÍČEK, MICHAL - HANTUCH, IGOR, JR. - HANTUCH, IGOR: *Energetický management s podporou IT*. In: Facility Management 2006 : Zborník prednášok zo 4.konferencie so zahraničnou účasťou. Bratislava,september 2006. - Bratislava : Slovenská spoločnosť pre techniku prostredia, 2006. - ISBN 80-89216-09-9. - S. 129-131

ŠTEVO, STANISLAV - JURÍČEK, MICHAL - HANTUCH, IGOR, JR. - HANTUCH, IGOR: *Možnosti využitia modelovania vo VR (virtuálnej realite) ako podporu pri projektovaní*. In: Facility Management 2006 : Zborník prednášok zo 4.konferencie so zahraničnou účasťou. Bratislava,september 2006. - Bratislava : Slovenská spoločnosť pre techniku prostredia, 2006. - ISBN 80-89216-09-9. - S. 124-126

SÚHRN

Základným problémom, ktorým sa predložená práca zaoberá je návrh vykurovacieho systému rodinného domu pomocou genetického algoritmu podľa zvolenej kritériálnej funkcie. Východiskovým bodom genetického algoritmu je simulácia vykurovacieho procesu v nástroji Comsol Multiphysics, ktorý využíva 3D model domu vytvorený v programe CATIA V5.

Kritériálna funkcia (fitness) GA môže mať rôznu podobu, t.j. jednoduchou modifikáciou GA môžeme vytvoriť rôzne alternatívy algoritmu hľadajúci optimálne riešenie podľa zadefinovaných podmienok. Takýmto spôsobom sme získali optimálne riešenie vykurovacieho systému z hľadiska minimálnych rozmerov vykurovacích telies, z pohľadu užívateľského komfortu a aj optimálnu teplotu vykurovacích telies z hľadiska riadenia. Podľa zvolenej fitness každého variantu sme dosiahli lepšie riešenie v porovnaní s reálom.

Použitý model (v rámci simulácie) bol kalibrovaný a verifikovaný podľa reálnych dát, pričom kalibrácia bola vykonaná pomocou genetického algoritmu hľadajúceho kombináciu parametrov modelu, aby sa dosiahla maximálna zhoda medzi simulačnými výsledkami a reálnymi dátami.

V práci bol predstavený nový prístup návrhu vykurovacieho systému rodinného domu, ktorý môže byť ľahko rozšriteľný aj v rámci väčších objektov.

SUMMARY

The basic problem which deals this Ph.D. thesis with is design process of heating system of family house by genetic algorithm and predefined criteria function. The starting point of genetic algorithm is a simulation of heating process in Comsol Multiphysics, which uses 3D model of a house created in CATIA V5.

The fitness function of GA can have various forms, so by simple modification of GA can we create many alternatives of algorithm which looks for optimal solution by predefined conditions. By this manner we gained optimal solution of heating system from the point of view of minimal dimensions of heating bodies, user comfort and also the optimal temperatures of heating bodies from the point of temperature control. We attained always better solution in comparison with the real solution by the prescribed criteria function.

Simulation model was calibrated and verified with the real data. The calibration process was done by genetic also by genetic algorithm, which found the best combination of model parameters with reference to achieving the best correspondence between simulation outputs and real data.

In the thesis was presented the new design approach of heating system of family house, which can be easily spreaded into larger object.