

Integrovaný přístup k řešení systému vytápění, větrání a klimatizace v budovách (HVAC)

J. L. M. HENSEN
Eindhoven University of Technology,
Group FAGO,
Eindhoven (Netherlands)

Vzájemné dynamické tepelné působení budovy a systémů vytápění, větrání a klimatizace (HVAC), které ji slouží, je dosud stále obtížné určit předem. Protože význam tohoto vzájemného tepelného působení v praxi vzrůstá, stávají se důležitějšími i všechny znalosti, související s tímto jevem, stejně jako i znalost prostředků k jeho vyhodnocení. V článku jsou uváděny důvody proč mají být tyto prostředky založeny na jednotném přístupu k celému problému.

V článku je v hlavních rysech popsán výzkumný projekt zaměřený na vývoj a zdokonalení prostředků pro hodnocení provozu budov ve vztahu ke sledovanému problému. Práce se zabývala rozšířením existující simulace energetického prostředí též na toky médií a na simulaci funkce strojního zařízení. Aplikace tohoto integrovaného simulačního systému je demonstrována na vzorovém příkladu.

Recenzoval Ing. Jiří Frýba

Hensen, J. L. M.

Towards an integral approach of building and HVAC system

The dynamic thermal interaction between a building and the HVAC systems which service it, is still difficult to predict. As this thermal interaction becomes more critical in practice, related knowledge and evaluation tools become increasingly important. It is argued why these need to be based on an integral approach of the overall problem.

A research project aimed at development and/or enhancement of building performance evaluation tools for this field of interest is outlined. The work involved expansion of an existing building energy simulation environment on the fluid flow and plant simulation side. Application of this integral simulation system is demonstrated by means of a case study.

Review by Frýba, J.

ÚVOD

Pro značně rozdílné dynamické vlastnosti budov, které je nutno vzít v úvahu, lze vzájemné tepelné působení mezi budovou a systémem vytápění, větrání a klimatizace (HVAC)^{1/}, které je navíc ovlivňováno chováním uživatele a vnějšími povětrnostními podmínkami, často jen obtížně předpovídat. V praxi mohou být jejich důsledkem neoptimální, špatně fungující nebo dokonce chybné kombinace budovy a systémů.

Existuje velké množství problémů, které skutečně vyžadují jednotný přístup k celému technickému systému, skládajícímu se ze stavební části budovy, uživatelů a systému HVAC. Typickými příklady jsou: vývoj řídicích systémů energetických zařízení v objektu, pasivní působení sluneční energie, vývoj systému HVAC a inteligentního řízení, zvláštní kombinace mezi budovou a systémem (např. podlahové vytápění, bazén atd.) a studie tepelné pohody, obsahující vzájemné tepelné působení budovy a systémů.

Počáteční výzkum v této oblasti se soustřeďoval na vztah mezi stavebním projektem budovy a spotřebou energie. Teprve později byla větší pozornost věnována strojnímu zařízení při řešení celkového problému. V původním přístupu byl vliv

systému HVAC víceméně zanedbán přílišným zjednodušením. I u pozdějšího přístupu byly složité toky energie v objektu silně zjednodušovány.

Tento výzkum [1], jsme začali s přesvědčením, že ani jednomu z předchozích přístupů nelze dát přednost, vzhledem k většině shora uvedených problémů: jak k objektu, tak k strojnímu zařízení se musí přistupovat rovnocenně co do komplexnosti i detailnosti.

NÁSTIN ŘEŠENÍ

Cílem je vývoj a zdokonalení metod vyhodnocení provozu budovy z hlediska vzájemného dynamického tepelného působení mezi budovou a jejím systémem HVAC. V našem výzkumu jsou tepelná pohoda a spotřeba energie hledanými funkcemi.

Pro výzkum bylo východiskem výzkumné prostředí pro energetickou simulaci ESP-r [2,3] (Energy Simulation Program), které je v současné době ve vývoji a je podrobováno přísnému hodnotícímu programu [4] v různých výzkumných ústavech po celé Evropě. Tato základna skýtá, jakožto východisko, obrovské přednosti všem výzkumným týmům. Nejdůležitější výhody jsou:

^{1/} Heating, ventilating and air-conditioning

1. ne každý tým musí mít odborné znalosti a zkušenosti ve všech oblastech;
2. oblasti, které nejsou předmětem bádání určitého výzkumného projektu se budou vyvíjet stejně rychle;
3. protože systém je využíván více lidmi, je nasnadě, že různé závady a nedostatky budou rychleji odhaleny;
4. přenos výsledků do mezinárodního výzkumného společenství je samozřejmý a tedy velmi efektivní.

Při započetí projektu byl systém ESP-r již značně pokročilý co se týče energetické simulace v objektu. Byla zde však zřetelná potřeba rozvinout simulaci proudění médií a simulaci funkce strojního zařízení a umožnit jejich lepší propojení s objektem.

SIMULACE PROUDĚNÍ MÉDIÍ

V uvažovaném případě se setkáváme s prouděním médií ve čtyřech hlavních oblastech:

- a) proudění vzduchu spárami a otvory v konstrukci budovy, tj. infiltrace a přirozené větrání;
- b) proudění vzduchu distribuční potrubní sítí navrženou tak, aby odpovídala požadavkům na tepelnou pohodu a kvalitu vzduchu;
- c) proudění vytápěcích a chladicích medií uvnitř strojního zařízení;
- d) proudění konvekčních tekutin ve vnitřních prostorách budovy a v částech zařízení.

Pro výpočet zatížení a energetické výpočty pro analýzu řízení systému, posouzení tepelné pohody a odhad rozptylu znečišťujících látek a vlhkosti, jsou nezbytné určité znalosti o velikosti tohoto proudění. Jakkoliv proudění tekutiny je prokazatelně důležitým hlediskem při simulaci kombinace budovy a zařízení, jeho analyzování značně zpomalilo modelování ostatních toků energie. Hlavní příčinou se zdá být nedostatek potřebných dat a z toho plynoucí obtíže při výpočtu.

V poslední době se klade větší důraz na simulaci proudění tekutiny dvěma existujícími metodami: metodou dynamiky proudění médií modelovanou počítačem (CFD = Computational Fluid Dynamics) a zonální sítovou metodou. V případě simulace kombinovaného proudění tepla a hmoty v budovách se zonální metoda jeví (alespoň v současné době) jako nejlépe srovnatelná s modelovou metodou použitou u ESP-r. Důvody pro to jsou následující:

- existuje pevný vztah mezi uzlovými sítěmi, které reprezentují tok médií, a odpovídajícími sítěmi, představujícími jeho tepelný protějšek, což naznačuje, že požadavky na informace o rovnicích zachování energie mohou být ihned splněny;

- metodu lze přímo aplikovat na budovy o více zónách a na zařízení pracující s více prvky, s více médii a s více sítěmi zařízení;

- počet použitých bodů bude značně nižší než požaduje metoda CFD a dodatečné ovlivnění metody je tedy minimalizováno.

U sítové metody se během každého simulačního časového kroku problém omezuje na ustálené proudění (třeba i dvousměrné) média ve všech větvích sítě, které představují toky hmoty v budově a zařízení. Informace o potenciálním proudění hmoty udává uživatel formou popisu uzlů, typů média (v současnosti se dává přednost vzduchu a vodě), typů průtokových prvků (např. clona, otvor, spára, dveře, vedení, trubka, ventil, čerpadlo, atd.), spojů a okrajových podmínek. Tímto způsobem vzniká uzlová síť odporů proudění média. Ta potom může

být na okrajích napojena na známé tlaky, nebo např. na soustavy tlakových koeficientů, které představují vztahy mezi sektory náporového větru a vnějšími povrchovými tlaky budovy, jejímž jsou výsledkem. Proudová síť se může skládat z několika volných subsítí a není omezena na jediný typ média. Všechny uzly a prvky v subsíti však musí odpovídat témuž typu média. Každý proudový prvek má jako protějšek instrukční podsít, která se používá k vytvoření proudění a derivace proudu při každé iteraci. Zachování hmoty v každém vnitřním uzlu je ekvivalentní fyzikální poučce, že součet proudů hmoty se v takovém uzlu musí rovnat nule. Protože tyto proudy jsou v nelineárním vztahu k tlakovému rozdílu, vyžaduje řešení iterací vypracování soustavy simultánních nelineárních rovnic, podřízených danému souboru okrajových podmínek. Použitá metoda řešení je založena na postupu navrženém Waltonem [5] a využívá simultánní Newton-Raphsonovu techniku celé sítě, která je aplikována na soustavu simultánních nelineárních rovnic.

Předkládaný modul simulace proudění hmoty poskytuje ještě dále zlepšené řešení. Tento modul může pracovat v odděleném modu (např. aby dokázal integritu sítě definovaného proudění). Výhodnější se však jeví, je-li použit v zapojení spolu s moduly energetické simulace pro hlavní budovu a zařízení. To umožňuje, aby studie energetická, kvality vzduchu a tepelné pohody byly vytvořeny z konfigurací společných pro budovu a zařízení, v nichž se rychlosti proudění tekutiny mohou měnit s časem podle změn teplot, tlaků nebo charakteristik toku médií.

SIMULACE FUNKCE STROJNÍHO ZAŘÍZENÍ

S ohledem na metody simulace dynamiky zařízení, lze rozlišit dva hlavní postupy:

1. postup sekvenčního modelování, jehož známým představitelem je TRNSYS [6] a

2. postup simultánního modelování, který je použit v tomto výzkumu. Zde je modelování systému HVAC dosaženo modulárně prvkovým postupem. Každý model prvku zařízení se skládá z jedné nebo více prostorových rovnic stavu konečného objemu, vyjadřujících zachování tepla a hmoty. Celý systém je kombinací modelů prvků, jejímž výsledkem je úplná soustava stavových rovnic pro celý systém. V době provozu má každá součást odpovídající podprogram, jehož úkolem je generovat koeficienty maticových rovnic.

Příkladem výzkumem preferovaných modelů prvků jsou: přípojky, adiabatické zvlhčovací zařízení, ventilátor, topný nebo chladicí výměník, kanály, deskový výměník tepla, kotle, radiátory, trubky, termostatické ventily radiátorů, pokojové termostaty, atd.

V daném rozsahu problému je kritérium pro volbu modelů prvků zařízení stanoveno tak, aby jejich úplnost zaručovala termodynamickou integritu. Na druhé straně musí být modely prvků co nejjednodušší (zvláště s ohledem na využití popisných parametrů) tak, aby uživatel mohl získat nezbytné údaje z dostupných zdrojů (tj. literatury, údajů od výrobce ap.)

I když se může zdát, že je v literatuře k dispozici množství hotových modelů jednotlivých prvků zařízení, v tomto případě zdání klame. Vyplývá to z následujících skutečností:

- většina modelů s kterými se setkáváme, je popsána analytickým způsobem (tj. žádným numerickým výrazem);

- téměř vždy numerické modely, na které narazíme, jsou způsobeny metodě sekvenčního modelování;

- většina modelů odráží postupy při ustáleném stavu;

- opakují se popisy téměř stejného modelu.

V literatuře nebyl nalezen žádný model, který mohl být použit bez úpravy. Vývoj nebo přizpůsobení modelů je často obtížné a časově náročné. Teprve nedávno byl dán podnět k tomu, aby byl tento proces usnadněn např. vytvořením databáze jednotlivých modelů prvků [7], vývojem univerzálního modelu, který by bylo možno použít pro různá simulační prostředí nebo vývojem dalších koncepcí, usnadňujících opakovaně použití modelů [9].

KOMBINACE PROUDĚNÍ TEPLA A HMOTY

Spojení budovy a zařízení v matematickém či numerickém smyslu ve skutečnosti znamená kombinaci maticových rovnic rovnováhy energie a proudění jak pro budovu, tak pro její zařízení [2]. I když je možné kombinovat všechny maticové rovnice pro budovu a zařízení s rovnicemi proudění tepla a tekutiny do jedné celkové "supermatice", nedělá se to především s ohledem na výhody, které plynou z rozčlenění problému.

Bezprostřední výhodou je výrazné snížení rozměrů matice a stupně rozptylu. Další výhodou je možnost snadného vyjmutí dílčích bloků jako funkce řešeného problému; např. jsou-li v problému zahrnuty úvahy pouze o budově nebo pouze o zařízení, o zařízení a proudění atd. Třetí výhodou je, že lze použít různá dílčí řešení, která jsou vhodně upravena pro dané typy rovnic - vysoce nelineární, diferenciální a tak dále.

Je však nutno uznat, že mezi různými bloky řešení často převládají termodynamické nebo hydraulické vazby. Jestliže proměnná v jednom bloku (řekněme teplota vzduchu v oblasti budovy) závisí na stavové proměnné, řešené v rámci jiného bloku (např. teplotě radiátoru), je nutné zajistit, aby obě hodnoty byly přizpůsobeny tak, aby byla zachována termodynamická integrita systému. Aniž bychom zacházeli do podrobností, nabízíme dvě metody řešení těchto vazeb:

1. zařízení k řízení časového kroku
2. iterační mechanismy.

POPIS POKUSNÉHO PŘÍPADU A ANALÝZA JEHO VÝSLEDKŮ

Typickým příkladem problému, u něhož je nutný integrovaný přístup, je zhodnocení funkce pokojového termostatu. Tento příklad byl inspirován poznatkami ze zkušebního provozu v relativně malém bytě s ústředním vytápěním, řízeným stále hojně používaným mechanickým pokojovým termostatem. Je však nutno poznamenat, že zkoumané problémy mají stejný význam i pro elektronické pokojové termostaty.

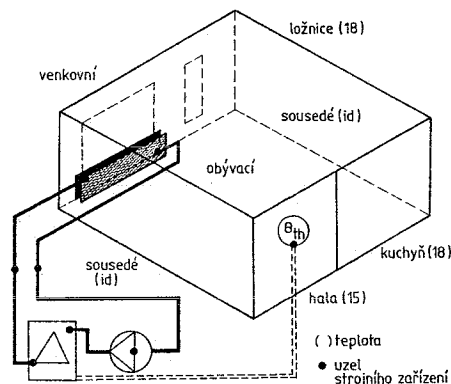
Technické úvahy vedly k některým modifikacím otopného systému v průběhu měření; jednou z modifikací bylo vyřazení zrychleného ohřevu termostatu (používaného k tomu, aby jeho čidlo rychleji dosáhlo vypínací teploty a tak se snížily rozdíly teploty vzduchu v místnosti). Zrychlený ohřev je velmi důležitý s ohledem na frekvenci spínání kotle. V tomto specifickém případě, při daných převládajících podmínkách prostředí byl časový cyklus spínání stykače hořáku asi devadesátkrát delší, byl-li zrychlený ohřev vypnut. Celková doba zapnutí hořáku - za stejný časový úsek - byla cca o 50 % kratší, což naznačuje značné snížení spotřeby paliva. Je však třeba upozornit na to, že v tomto specifickém případě lze jak počet cyklů za hodinu (v podmínkách průměrné topné sezóny cca 30), tak tepelné ztráty zásobníku tepla považovat za nadprůměrné.

Delší doba cyklu je též závislá na kolísání teploty vzduchu. Bez urychlujícího čidla je kolísání střední teploty vzduchu v po-

koji během jednoho cyklu mnohem větší. Zda by takto vytvořené podmínky byly pro obyvatele přijatelné, bylo zkoumáno rovněž při použití literatury, která se týká tepelné pohody v podmínkách přechodového stavu.

Cílem předkládané studie bylo zjistit, zda shora popsaná pozorování je možno opakovat - počítačovým modelováním - pro obecnější případy a prozkoumat, zda pokles rychlosti ohřevu termostatu by mohl být vhodnou metodikou pro potenciální akumulaci energie.

Představme si uspořádání budovy a strojního zařízení, jak je schematicky zobrazeno na obr. 1. Místnost je částí domu uvažovaného pro energetický výzkum; v tomto případě ho představuje typický holandský řadový domek. Vnější plášť je izolován podle platných předpisů. Pro tuto studii je teplota vzduchu v prostorách sousedících s obývacím pokojem udržována na konstantních hodnotách, jak je uvedeno. Obývací pokoj je vyhříván ústředním topným systémem skládajícím se z dvoudeskového radiátoru (dvouuzlový model), vysoce výkonného kondenzačního kotle (zmenšeného v měřítku tak, aby vyhovoval jednoradiátorovému systému), čerpadla, dodávajícího stálý průtok vody, trubek, jak je znázorněno, a mechanického pokojového termostatu, umístěného v obývacím pokoji.

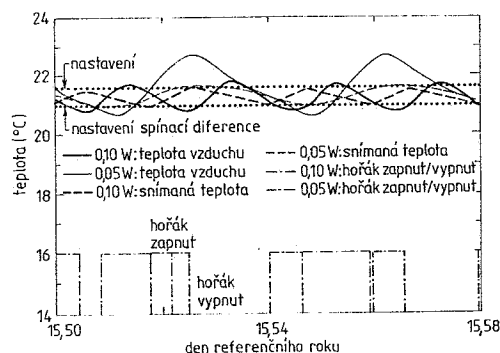


Obr. 1 Schematické znázornění uspořádání budovy a systému obsahující obývací pokoj vytápěný částí systému ústředního vytápění

K řízení provozu zařízení byly určeny dva regulační obvody:

1. spouštění kotle na základě teploty snímané pokojovým termostatem
2. simulace zrychleného ohřevu pokojového termostatu.

Velikost tepelného příkonu je primárním parametrem, který je nutno vzít v úvahu pro následující postup. Pro ilustraci vlivu stupně zrychlení ohřevu, ukazuje obrázek 2 některé výsledky



Obr. 2 Vliv zrychleného ohřevu na kolísání střední teploty vzduchu v obývacím pokoji a na teplotu snímanou pokojovým termostatem během dvouhodinové simulační periody.

simulace, obsahující dvouhodinovou periodu klimatického referenčního roku. Jde o simulace pro dvě hodnoty příkonu ohřevu termostatu: 0,05 a 0,10 W. V daných podmínkách se pak vyskytnou přibližně jeden nebo dva cykly za hodinu, což má za výsledek teplotní rozdíly vzduchu cca 1 a 2 K. Obr. 2 také ukazuje nastavený rozdíl. Je vidět, že v případě příkonu 0,05 W snímaná teplota dál vzroste i po vypnutí hořáku. K tomu dochází proto, že v těchto časových bodech je teplota vzduchu v místnosti ve skutečnosti vyšší než teplota nastavená na termostatu. Pověšimněte si, že existují dva přechodové faktory, které hrají roli při časovém zpoždění a snížení teploty snímané termostatem ve srovnání s teplotou v místnosti:

1. snímaná teplota závisí jak na teplotě vzduchu, tak na teplotách konstrukce objektu (jejichž změna se opožděje v důsledku tepelné setrvačnosti stavebních materiálů),

2. účinky tepelné setrvačnosti vlastního topného systému.

Aby se zjistilo, zda je rovněž ovlivněna celková spotřeba plynu, proběhlo několik simulací v období od 12. do 15. ledna včetně - pro různá zrychlení ohřevu. Z výsledků, které zde nejsou uváděny, je zřejmé, že kdyby simulace vycházely z konstantně nastavené hodnoty na termostatu, vedlo by to k různým průměrným teplotám vzduchu v místnosti. Je jasné, že by pak výsledky byly nesrovnatelné. Proto bylo zvoleno několik nastavení termostatu (metodou pokusu a omylu) tak, aby konečná pokojová teplota (po 15.lednu) byla stejná. Nejdůležitější výsledky simulace - s ohledem na zkoumaný problém - jsou shrnuty v tabulce č.1.

Jestliže se porovnájí frekvence cyklů a odpovídající rozdíly teplot vzduchu s kritérii tepelné pohody pro přechodové podmínky, všechny případy uvedené v tabulce 1 se nacházejí v mezích tepelné pohody. Porovnáme-li výsledky spotřeby plynu pro případy se stejnou průměrnou teplotou vzduchu, tabulka č.1 opravdu dokazuje, že je možno akumulovat energii i při zachování podmínek tepelné pohody tím, že se sníží frekvence cyklů hořáku. Snížení frekvence cyklu ze 4,5 na 2,0/h má za následek snížení spotřeby plynu pouze o 1 %, uvažujeme-li celou periodu, ale snížení o 7 %, bereme-li v úvahu pouze průměrný den topné sezóny (tj. 15.1.). To naznačuje, že optimálním řešením je použít metodu "řízení frekvence cyklu" vůběrově, tj. v závislosti na počasí.

Je patrné, že ve shora uvedeném zkoumání se musí dále pokračovat, aby byl nalezen optimální přístup (tj. pro prohloubení poznatků pro inteligentní řízení) a zjištění, na který typ otopného systému se dá aplikovat. V našem výzkumu by měl být tento vzorový příklad považován spíše za ukázkou našeho postupu.

ZÁVĚR

Článek popisuje "modulárně-simultánní" postup při simulaci kombinovaného proudění tepla a médií v rámci budovy a strojního zařízení. Současné výsledky použití modelu naznačují, že je účelné simulovat uspořádání modelů i budova-zařízení v přechodovém stavu a na stejné úrovni propracovanosti.

Přestože je model robustní a dobře uzpůsobený pro řešení úlohy, bylo specifikováno několik nutných budoucích úprav. Ty zahrnují vývoj přídatných proudových prvků (zvláště vylepšené modely velkých otvorů), vývoj dalších modelů přídatných prvků v požadovaném rozměru zkušebního prostoru a experimentální vyhodnocení zjednodušujících předpokladů v modelech prvků.

Tab. 1 Výsledky simulací od 12. do 15. ledna včetně různých stupňů zrychleného ohřevu aplikovaného na mechanickém pokojovém termostatu

Popis	Hodnota parametru nebo výsledek				
Zrychlený ohřev (W)	0,20	0,10	0,05	0,01	0,01
Nastavená teplota (°C)	22,4	21,5	21,5	21,5	20,8
Celková průměrná teplota vzduchu (°C)	20,6	20,7	21,1	21,5	20,8
ale pouze pro 13.1. (°C)	20,4	20,7	21,1	21,3	20,4
ale pouze pro 15.1. (°C)	21,3	21,3	21,6	22,0	21,3
Průměrná frekvence cyklu pouze 13.1.(za hod)	4,0	1,8	1,9	0,8	0,8
pouze 15.1.(za hod)	4,5	2,0	1,1	0,9	0,9
Rozdíl teploty vzduchu pouze 13.1.(K)	0,3	1,3	2,3	3,3	3,3
pouze 15.1.(K)	0,3	1,0	2,1	3,0	3,0
Celková spotřeba plynu	16,1	16,0	16,6	17,1	16,0
dtto pouze 13.1.(m ³)	4,9	5,0	5,2	5,4	5,1
dtto pouze 15.1.(m ³)	2,9	2,7	2,9	3,0	2,7

Poděkování

Autor děkuje profesorovi J.A.Clarkeovi z University of Strathclyde v Glasgowě za poskytnutou podporu.

Literatura:

- [1] HENSEN, J.L.M.: On the thermal interaction of building structure and heating and ventilating system. *Doctoral dissertation*, Eindhoven University of Technology (FAGO), 1991.
- [2] CLARKE, J.A.: Energy Simulation in Building Design, Adam Hilger Ltd., Bristol, 1985.
- [3] CLARKE, J.A., HAND, J., STRACHAN, P., HENSEN, J.L.M. and PERNOT, C.E.E., ESP: A building and plant energy simulation research environment, ESRU Manual U91/2, Energy Simulation Research Unit, University of Strathclyde, Glasgow, 1991.
- [4] CED, The PASSYS Project Phase 1. Subgroup Model Validation and Development Final Report 1986-1989, 033-89-PASSYS-MVD-FP-017, Commission of the European Communities, DG XII of Science, Research and Development, Brussels, 1989.
- [5] WALTON, G.N.: Airflow network models for element-based building airflow modelling, ASHRAE Trans, 95 (2) 1989, pp. 613-620.
- [6] TRNSYS, a transient system simulation program, Engineering Experiment Station Report 38-12, University of Wisconsin-Madison, Solar Energy Laboratory, Madison, WI, 1988, Manual for version 12.2 and later.
- [7] LEBRUN, J. and LIEBECQ, G.: System simulation in buildings; models of HVAC components, Proc. USER 1 Working Conference, Ostend, Society for Computer Simulation International, Ghent (B), 1988, pp. 17-22.
- [8] SAHLIN, P. and SOWELL, E.F.: A neutral format for building simulation models, Proc. Building Simulation 89, International Building Performance Simulation Association IBPSA, Vancouver, pp. 147-154.
- [9] MATTSSON, S.E.: Concepts supporting reuse of models, Proc. Building Simulation 89, International Building Performance Simulation Association IBPSA, Vancouver, pp.175 - 180.
- [10] HENSEN, J.L.M.: Literature review on thermal comfort in transient conditions, Build. Environ, 25 (1980) pp. 309-316.