

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební
Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering

doc. Ing. Karel Kabele, CSc.

Modelování energetických systémů budov
Modelling of building energy systems performance

Summary

Contemporary development of architectural engineering and building services providing building operation is related to energy supply and use. The level of building dependence on energy is given by architect's priorities during conceptual design phase. Within existing traditional buildings it is possible to predict energy performance using empirical formulas, experience and simplified models, while within modern buildings it is difficult to describe synergy performance of particular building energy systems and its impact on indoor environment quality and energy performance. For these and other cases it is possible to use numerical modelling of building energy systems and create virtual laboratory to perform experiments with the building and to optimise building design.

Different viewpoints are used to classify tools for building simulation. According to the method, detail level and model purpose following classes are classified: static models, simplified dynamic models, response function models, numerical methods models, analogy with electrical circuits and CFD (computational fluid dynamics) models.

Two case studies illustrate examples of numerical modelling and building energy performance simulation within applied problems solution. The first one is focused on CFD modelling for low-energy cooling system design support, where the simulation quantified the impact of chilled ceilings on the working environment in a library hall.

Second case study shows an integrated simultaneous dynamic model of building energy performance including building envelope, building operation and air-conditioning system auxiliary energy use. The model supported the decision process during the selection of a suitable air-conditioning system.

Finally some prospects of further development in this domain are mentioned. They focus on numerical models linking with building control systems, on research in the field of boundary conditions description, especially load profiles of climatic data and stochastic models development for human factor description. In the domain of CFD it is a linkage of existing tools with results of latest research in indoor environment evaluation. Last but not least it is an integration of life cycle analysis based on simulation results.

Souhrn

Současný vývoj stavitelství a technických zařízení, zajišťující provoz budovy je z velké míry podmíněn dodávkou energií. Míra závislosti budovy na energii je dána prioritami při jejím koncepčním návrhu. Zatímco u tradičních staveb bylo možné energetické chování budovy předvídat na základě empirických vztahů a zjednodušených modelů, u novodobých budov není mnohdy tento přístup postačující pro popis synergického působení jednotlivých subsystémů budovy a jeho dopadu na výsledný stav vnitřního prostředí a energetickou bilanci. Pro tyto a další případy je možné použít numerického modelování energetických systémů, jenž umožňuje na úrovni virtuální laboratoře provádět experimenty a optimalizovat návrh objektu.

Základní rozdělení nástrojů pro modelování je provedeno z různých hledisek - podle použité metody, míry komplexnosti modelu a účelu modelu, kdy jsou klasifikovány statické modely, zjednodušené dynamické modely, modely na principu sestavení funkce popisující odezvu systému, modely sestavené na základě numerických metod a analogie s elektrickými obvody a modely využívající CFD (computational fluid dynamics).

Na dvou případových studiích jsou dokumentovány příklady použití numerického modelování a simulace energetického chování budov při řešení aplikovaných problémů.

První studie se zabývá využitím CFD při návrhu nízkoenergetického chlazení historického objektu, kdy simulace prokázala a kvantifikovala vliv chladicího stropu na pracovní prostředí.

Druhá studie pak ukazuje užití integrovaného simultánního dynamického modelu energetického chování budovy a systému klimatizace pro podporu výběru vhodného systému na úrovni koncepčního rozhodování ve studii.

V závěru jsou naznačeny perspektivy dalšího vývoje v této oblasti, zaměřené na provázání simulačních modelů z úrovně projektu na řídicí systém budovy, dále na výzkum v oblasti zkvalitnění popisu okrajových podmínek, zejména pak zátěžových profilů klimatickými podmínkami a vývoj stochastických modelů pro popis lidského faktoru. V oblasti CFD je to propojení stávajících nástrojů s nejnovějšími poznatky v oblasti vyhodnocení vnitřního prostředí budov. V neposlední řadě je to analýza a integrace vazeb na hodnocení budov v celém životním cyklu.

Klíčová slova

Energetická náročnost budov, energetické systémy budov, numerické modelování, CFD, případové studie, nízkoenergetické chlazení, klimatizace, vytápění

Keywords

Building energy performance, building energy systems, numerical modelling, CFD, case studies, low-energy cooling, air-conditioning, heating

České vysoké učení technické v Praze

Název: Modelování energetických systémů budov

Autor: doc. Ing. Karel Kabele, CSc.

Počet stran:

Náklad: 150 výtisků

(C) Karel Kabele, 2006

ISBN

Obsah

1	Úvod do problematiky	6
1.1	Základní principy aplikace numerického modelování v energetických systémech budov	8
1.2	Rozdělení nástrojů pro modelování	11
1.2.1	Statické modely	12
1.2.2	Zjednodušené dynamické modely	12
1.2.3	Metody založené na základě numerických metod	13
1.2.4	Analogie s elektrickými obvody	13
1.2.5	CFD	13
2	Použití modelování a simulace energetického chování budov	15
2.1	Aplikace CFD při návrhu nízkoenergetického chlazení	17
2.1.1	Úvod	17
2.1.2	Popis problému	17
2.1.3	Analýza problému	18
2.1.4	Model	19
2.1.5	Simulované varianty	20
2.1.6	Výsledky simulace	21
2.1.7	Technické řešení	21
2.1.8	Závěr	22
2.2	Aplikace dynamického modelu pro porovnání systémů klimatizace na úrovni konceptního rozhodování	23
2.2.1	Popis objektu	23
2.2.2	Řešené varianty	24
2.2.3	Modelování a simulace	24
2.2.4	Závěr	26
3	Perspektivy	26
4	Poděkování	27
5	Použitá literatura	27
	Doc.Ing.Karel Kabele, CSc.	32

1 Úvod do problematiky

Vývoj stavitelství a architektury v posledních letech lze charakterizovat jako hledání atraktivních a úspěšných řešení, jež vyházejí z kritérií dané současnou mírou globalizace a propojení kultur. Jednou z hnacích sil vývoje v této oblasti jsou stále se zvyšující ceny energie, vyplývající ze stále větší závislosti naší civilizace na energii a z toho vyplývající trendy při hledání řešení kladoucích důraz na ekonomii provozu, kvalitu vnitřního prostředí a jeho vliv na zdraví a pracovní výkon. Toto se odráží ve vývojových směrech řešení technických systémů budov – od staveb překonávajících výškové rekordy využívajících nejmodernější technologie přes stavby vycházející z přírodních principů až po stavby nízkonákladové a nízkooenergetické.

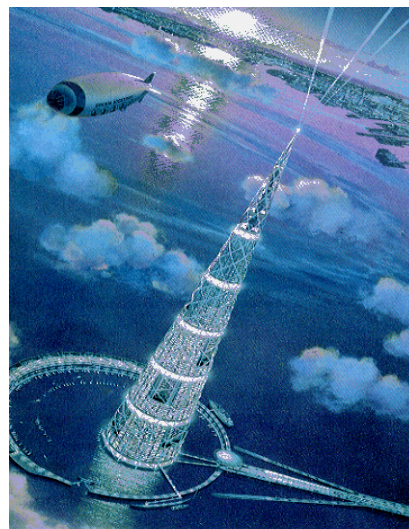
Příkladem „hi-tech“ stavby je projektovaná Millenium Tower v Tokiu [46] o výšce 850 m od známého architekta Normana Fostera s cílem vytvořit vertikální město, zajišťující bydlení a práci pro 20000 obyvatel (obr.1).

Příkladem stavby vycházející z přírodních principů může být škola Eastgate Harare v Zimbabwe [47], kde autor využil principů přirozené klimatizace termitišť (obr.2) a vhodnou orientaci budovy, umístěním akumulčních stěn a kanálů pro přirozené proudění vzduchu vlivem vztlačových sil vytvořil objekt s velmi malou spotřebou energie a na místní klimatické podmínky příznivým vnitřním prostředím.

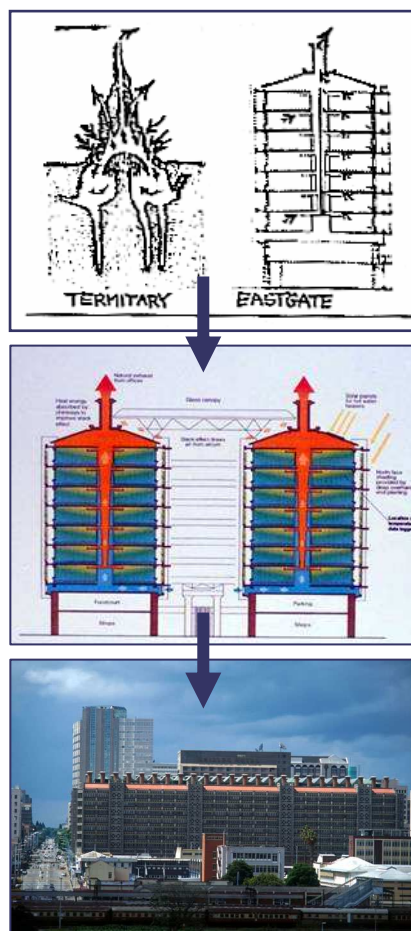
Příkladem nízkooenergetické stavby s nízkými investičními náklady může být nedávno dokončený pilotní projekt bytového domu v Sušici [48] (obr.3), nabízející bydlení pro 12 rodin v bytech s řízeným větráním a energeticky úsporně řešenou dispozicí.

Jistě tento výčet není úplný, nicméně jednotícím prvkem u všech současných budov je energie, potřebná k provozu budovy. Jedná se o energii potřebnou pro

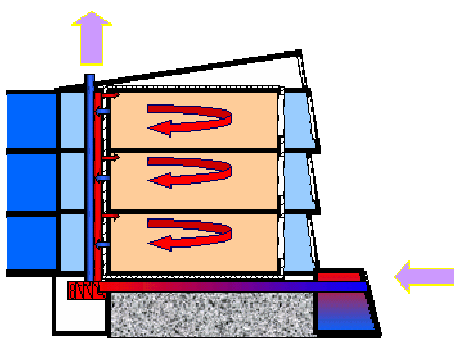
- zajištění požadovaných parametrů vnitřního prostředí budov (vnitřní teplota, kvalita vzduchu, umělé osvětlení);



Obr. 1 Projekt Millenium Tower - Tokio



Obr. 2 Eastgate Harare - Zimbabwe



Obr. 3 Nizkoenergetický nízkonákladový bytový dům Sušice

- pokrytí hygienických potřeb člověka (zdravotechnika, příprava teplé vody);
- distribuci energie a médií (elektroinstalace, plynovod, technické plyny);
- řídicí a regulační systémy budov (EPS, EZS, regulace, zabezpečení, inteligentní budovy);
- dopravní systémy (výtahy, eskalátory, travelátory, potrubní pošta);
- technologická zařízení (centrální vysavače, kuchyně, prádelny, bazény apod.).

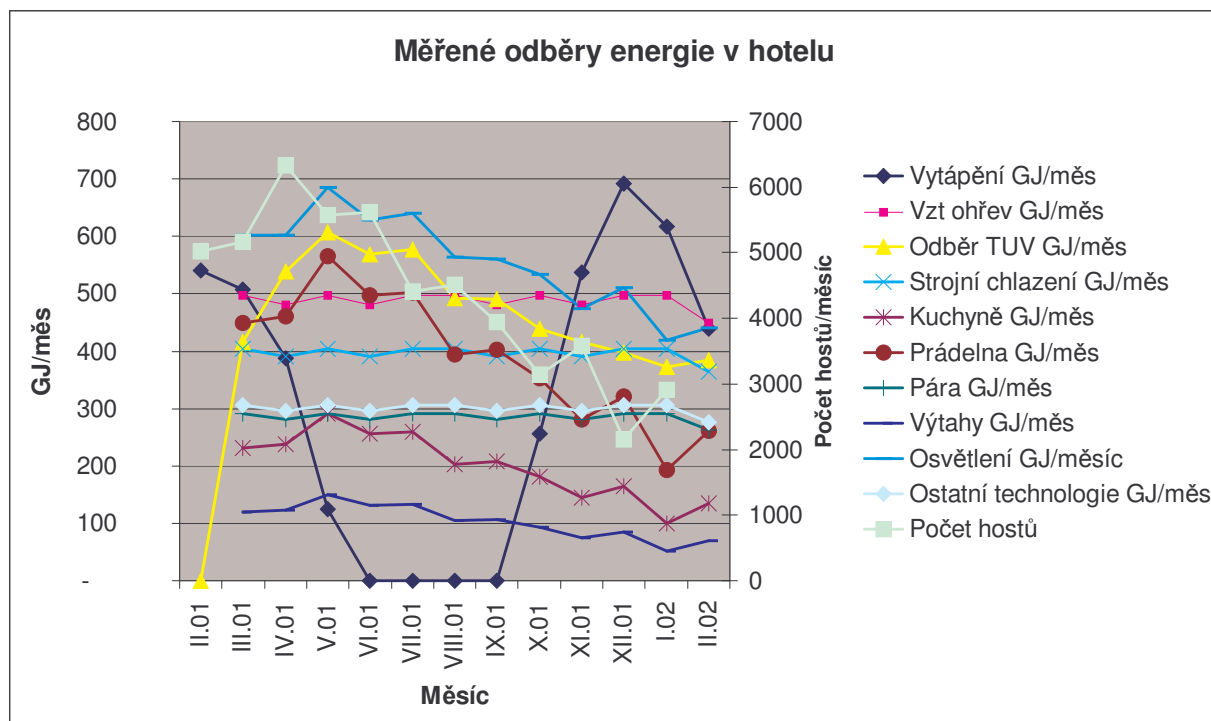
Popis energetického chování budovy, což je souhrnné vyjádření průběhu energetických toků v jednotlivých subsystémech, jejich vzájemných interakci, výsledný tok energie v měřených místech a časoprostorový snímek parametrů vytvářeného vnitřního prostředí je základem pro optimalizaci budovy a systému z hlediska energetické náročnosti [1].

U existujících budov lze na základě měření dodané energie (obr.4), průtoků a teplot jednotlivých teplonosných látek a průběhu vybraných parametrů vnitřního prostředí energetickým auditem zjistit místa možných energetických úspor a navrhnout k realizaci opatření, vedoucí ke snížení potřeby i spotřeby

energie. Tento postup však není možný použít pro budovy navrhované ve fázi projektu. Pro standardní a jednoduché objekty lze při stanovení očekávané energetické náročnosti vycházet z analogie a empirických vztahů, používaných již od počátků evropské školy TZB (technických zařízení budov), která se datuje do 80.let 19.století. Pro moderní, technologií vybavené budovy se sofistikovanými stavebními konstrukcemi a striktními požadavky na definovaný stav vnitřního prostředí však klasické výpočtové nástroje nejsou dostatečně citlivé a přesné a proto od 80.let 20 století datuje počátek rozvoje aplikace metod numerického modelování a simulace energetického chování budov. Skupina kolem prof. Joe Clarka z University of Strathclyde, Glasgow, založila mezinárodní organizaci IBPSA (International Building Performance Simulation Association), která sdružuje odborníky v simulaci budov a od roku 1985 pořádá pravidelně v dvouletém cyklu konference Building simulation. Česká republika se po mnohaleté individuální spolupráci pedagogů stavební a strojní fakulty ČVUT v Praze připojila založením IBPSA-CZ v roce 1997,

v souvislosti s pořádáním mezinárodní konference Building simulation 1997 v Praze.

Od této doby se metody numerického modelování a simulace postupně dostávají do praxe a rozvíjí se jejich použití.



Obr. 4 Příklad naměřených odběrů energie pro jednotlivé subsystémy TZB v hotelu

1.1 Základní principy aplikace numerického modelování v energetických systémech budov

Vývoj výpočetní techniky v posledních letech umožnil rozvoj nových metod a prostředků, které podporují navrhování budov a jejich technických zařízení. Vedle velmi pohledných a komerčně úspěšných grafických prostředků pro podporu procesu navrhování (CAD programů) se i v oblasti energetických systémů budov začínají prosazovat výpočtové programy, které dokáží popsat chování budovy nebo její části, za proměnných klimatických a provozních podmínek, označované souhrnně simulační programy. Pod pojmem popis chování budovy zde můžeme očekávat například průběhy teplot v závislosti na čase, průběhy okamžitých potřeb tepla i celoroční bilance, dvoj i trojrozměrně zobrazení proudění vzduchu v místnostech. Účelem těchto programů je ještě ve fázi návrhu budovy prověřit její předpokládané chování za různých podmínek a dát tak podklady k optimalizaci návrhu[15].

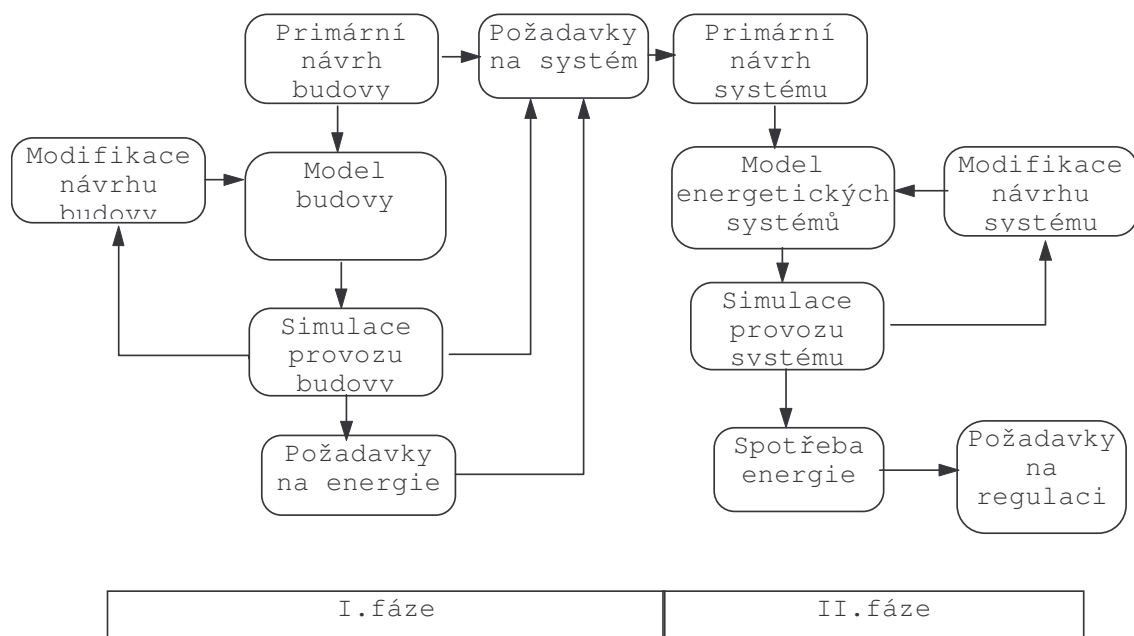
Použití metod počítačové simulace lze přirovnat k virtuální laboratoři, ve které vytvoříme do jisté míry zjednodušený model budovy nebo její části, tento model vystavujeme působení různých klimatických a provozních podmínek a

„měříme“, co se ve sledovaných místech modelu děje. Tímto způsobem jsem schopni s minimálními náklady ve srovnání se skutečným modelem a fyzikálními měřeními prověřit desítky až stovky variant řešení různých konstrukčních prvků a vytvořit tak například optimalizační funkci pro stanovení velikosti tohoto prvku.

Na druhou stranu je nutno upozornit na to, že práce s počítačovým modelem energetického chování budovy je velmi náročná jak z hlediska požadavků na hardware i software, tak z hlediska jejího použití. U tak složitého systému, jako je budova a její technická zařízení, je totiž velký problém ve stanovení vstupních hodnot, kterými bývají fyzikální a geometrické vlastnosti jednotlivých prvků a použitých materiálů. Počítačový model bývá totiž v závislosti na použité metodě výpočtu velmi citlivý na jednotlivé parametry a snadno se může stát, že výsledek je ve vztahu k realitě naprosto irelevantní, právě z důvodu drobného přehlédnutí nebo obyčejného překlepu kdesi na začátku. Z tohoto důvodu je každý seriózní simulační program podrobován velmi náročným verifikacím a testování a každý vytvořený počítačový model by měl být otestován ve známých podmínkách.

Z těchto důvodů je nutno hledět i na praktickou aplikaci těchto metod. Tak jako se nedělá skutečný model pro každou budovu a při návrhu se vychází ze zkušeností a zjednodušených výpočtových metod (tepelné ztráty, denostupňová metoda atd.), nemá smysl zpracovávat pro každou budovu počítačový model. Použití těchto metod je však naprosto na místě tam, kde chybí zkušenost s obdobným problémem a kde je řešen atypický problém. Do této skupiny bezpochyby patří většina prosklených budov, atriových staveb, shromažďovacích místností, nízkoenergetických budov, kde zkušenosti s realizovanými budovami navrženými tradičními postupy bývají mnohdy velmi bolestivé – podle normy navržené vytápění nebo chlazení nedostačuje v extrémních podmínkách, obyvatelé si stěžují na nepříjemné vnitřní prostředí a takto by se dalo jmenovat dál.

Problém modelování energetických toků v budovách je většinou rozdělen do dvou fází [1]. V první, jak vyplývá z obr.5, je primárním účelem modelu stanovení energetických nároků, zajišťujících požadované vnitřní prostředí. Pro modelování tohoto stupně se vychází v podstatě z modifikace výpočtů tepelných ztrát a zisků na základě tepelně-technických vlastností budovy a požadavků na vnitřní prostředí. Ve druhé fázi jsou tyto energetické nároky modifikovány provozní charakteristikou aktivního systému budovy a získáváme tak skutečnou potřebu energie.



Obr. 5 Vazba mezi modelem budovy a modelem energetického systému

První fáze je tak zaměřena na minimalizaci energetických nároků (a tím snad i spotřeby energie), zatímco ve druhé fázi se zaměřujeme na použití takového systému, který co nejvíce svou charakteristikou odpovídá požadavkům při minimální spotřebě energie. Pochopitelně lze vytvořit model, který je kombinací modelu budovy a systému současně. Bez ohledu na úroveň provázanosti modelu aktivního systému s budovou je nutné model budovy vytvořit, neboť pouze na základě tohoto modelu je možné stanovit reálné požadavky na energetický systém.

Pro modelování energetických systémů budov existují dva přístupy- **sekvenční** a **simultánní**.

V sekvenčních modelech je každý prvek nahrazen vztahem mezi vstupní a výstupní hodnotou tak, že pokud je zapojen do systému, stává se výstupní hodnota z prvku vstupní hodnotou pro další prvek. Tím, v určitém časovém okamžiku, může začít simulace při známých okrajových podmínkách – třeba vnější teplotě nebo teplotou v budově generovanou již dříve modelem budovy – s kalkulací postupující celým systémem. Jednotlivé komponenty jsou proto nahrazeny "černou skříňkou" – algoritmem, který může být buď jednoduchý, nebo komplexní. Tato technika má určité výhody – pro každý prvek lze použít jinou metodu pro jeho modelování a s postupujícím technickým poznáním je možné model stále zdokonalovat. Problém nastává v okamžiku, kdy je nutný vstupní údaj který ještě nebyl spočten nebo chceme zohlednit dynamické řízení systému.

Při simultánním přístupu je systém nahrazen uzlovým schématem. Toky energií mezi jednotlivými uzly jsou vyjádřeny soustavou rovnic derivovaných v čase a prostoru.

Tato matice je začleněna do matice popisující budovu a takto vzniklá matice je řešena najednou a opakovaně tak jak je zvolen konečný časový krok. Přístup založený na moderované komplexnosti je proto, aby formuloval systémovou matici ve vztahu k jednouzlovému prvku a potom aby závisel na algoritmu "černé skříňky", pracujícím paralelně, aby vyjádřil vnitřní chování prvku. Tepelné kapacity prvků jsou zahrnuty, metoda zůstává stále simultánní ale modelovací úloha je méně komplexní. A navíc model každého komponentu může využít právě aktuální teorii. Systémová matice soustavy je systém spojující protokol a tak problémy spojené se sekvenčním přístupem odpadají. Integrací matice budovy a soustavy se celý problém značně zjednodušuje, neboť se používá jediného nástroje pro jejich řešení, kterým je metoda implicitních konečných diferencí.

1.2 Rozdělení nástrojů pro modelování

Smyslem modelování energetických toků není dosažení absolutní shody modelu s realitou, neboť i v tomto případě je nutno "optimalizovat" vynaložené prostředky a energii na sestavení modelu a následnou simulaci v závislosti na očekávaném přínosu.

Protože optimalizace vnitřního prostředí budov je složitým problémem s mnoha vazbami, je pro mnoho případů nutné získat nejprve základní orientaci v problému a teprve po zjištění váhy jednotlivých faktorů je možné pokračovat ve zpracování detailního modelu [49].

Základní klasifikace modelů vyplývá z použité metody:

- statické modely;
- zjednodušené dynamické modely;
- modely na principu sestavení funkce, popisující odezvu systému;
- modely sestavené na základě numerických metod;
- analogie s elektrickými obvody.

Druhé kritérium klasifikace modelů energetického chování vnitřního prostředí budov je míra komplexnosti modelu. Jsou to především:

- modely budovy;
- modely energetického systému nebo jeho části;
- integrované modely budovy a systému.

Dalším kritériem klasifikace je účel modelování

- vnitřního prostředí;
- chování systému;
- interakce budovy a systému.

1.2.1 Statické modely

Tyto metody slouží k základní orientaci v problému a používají se též pro běžné navrhování systémů. Neobsahují většinou žádné mechanismy pro popis chování budovy v čase za proměnných podmínek a pro popis interakce jednotlivých subsystémů budov. Vycházejí z těchto předpokladů [1]:

- Fourierova rovnice vedení tepla se redukuje na jednorozměrný problém v ustáleném stavu, neuvažuje se tepelná kapacita materiálů;
- tepelná vodivost materiálů je konstantní, pro popis tepelně-technických vlastností konstrukcí se používá součinitele prostupu tepla U ;
- součinitelé přestupu tepla při konvekci jsou konstantní a stejné po celém povrchu konstrukce;
- dlouhovlnná radiace je zjednodušena na linearizovaný součinitel osálení, který je v čase neměnný a platný pro celý povrch. Při popisu vnějších konstrukcí jsou účinky radiace často slučovány nebo nahrazovány účinky konvekce (rovnocenná sluneční teplota). Krátkovlnná radiace především u slunečního záření se nahrazuje dlouhovlnnou radiací s koeficientem účinnosti;
- modelování proudění vzduchu vychází z ustáleného stavu a z předpokladu ideálního promísení vzduchu v jednotlivých zónách;
- náhodné tepelné zisky jsou většinou dány konstantní hodnotou bez časových průběhů a extrémů;
- klimatické podmínky jsou redukovány na výpočtové teploty bez časového průběhu (pro navrhování systémů), nebo denostupně (pro odhady potřeby energie);
- energetické systémy jsou idealizovány a vliv regulace a technického řešení se vyjadřuje konstantní účinností, která je ve skutečnosti proměnná v závislosti na podmínkách;
- průběh využití budovy je zjednodušen na konstantní vnitřní teplotu. Některé metody respektují např. přerušované vytápění a používají korekční faktory na snížení teploty v době otopné přestávky a korekci optimální výsledné teploty v závislosti na venkovní teplotě.

1.2.2 Zjednodušené dynamické modely

Zjednodušené dynamické modely vycházejí převážně z regresní analýzy výsledků vícenásobného běhu statických modelů za různých okrajových podmínek. Tyto modely nejsou schopny postihnout charakteristiku přechodových dějů, jsou však schopny zohlednit chování budovy (systému) za různých podmínek.

1.2.3 Metody založené na stanovení funkce popisující odezvu systému

Pro jednodušší systémy lze stanovit na základě okrajových podmínek matematickou funkci, popisující dynamickou odezvu systému. Existují dvě hlavní větve této metody - časová a frekvenční odezva [9].

1.2.4 Metody založené na základě numerických metod

Se zvyšujícími výkony výpočetní techniky se stále více aplikují numerické metody. Pro modelování aktivních systémů se jako vhodné jeví metoda konečných diferencí a metoda konečných prvků. Metoda konečných diferencí je jedna z nejčastěji používaných v oboru modelování budov.

1.2.5 Analogie s elektrickými obvody

Analogie mezi tepelnými a elektrickými toky vede k aplikaci metod používaných v elektrických systémech na tepelné systémy. Tato metoda je výhodná především pro oblast základního výzkumu, neboť umožňuje v poměrně krátkém čase provést simulaci dlouhých období, zatím je však málo praktických aplikací [9].

1.2.6 CFD

Vývoj výpočetní techniky a aplikací zpřístupnil další oblast využití počítačového modelování a simulace energetických systémů budov, kterou je modelování dynamických jevů v proudících tekutinách. Metoda, využívaná pro tento typ simulací, se celosvětově nazývá CFD (Computational Fluid Dynamics), ve volném českém překladu počítačové modelování proudění tekutin. Metodou CFD lze získat představu nejen o proudění, ale také o přenosu tepla a hmoty, změnách skupenství (var, mrznutí, odpařování, tání), chemických reakcích (spalování), mechanicky vyvolaném pohybu (míchání), a řadě dalších souvisejících jevů [4]. Ve výsledku tak lze získat například obraz proudění vzduchu v místnosti s rozložením teplot a rychlostí, průběh teplot a relativních vlhkostí ve spalínové cestě kotle, jevy související s vrstvením teplé vody v zásobníku teplé vody, vliv sálavého vytápění na tepelnou pohodu ve vytápěné místnosti a další.

Matematická reprezentace výše uvedených jevů vede k řešení soustavy nelineárních parciálních rovnic druhého řádu. Proměnné používané v CFD jsou vektory rychlosti v karteziánských souřadnicích, skaláry tlaku a teploty tekutiny a pevné látky nebo obou. Tyto proměnné jsou funkcí souřadnic x, y, z a času. Diferenciální rovnice řeší rovnovážný stav založený na zákonu o zachování energie. Soustava rovnic popisuje stav v uzavřené oblasti, která má definované okrajové podmínky. Vstupním parametrem jsou i vlastnosti modelované tekutiny, vyplňující oblast, jako je např. tepelná vodivost, hustota, viskozita, měrná tepelná kapacita, teplotní roztažnost a součinitel difúze.

Soustava rovnic, a k nim příslušných okrajových podmínek, nemá většinou obecné analytické řešení. Existují částečná řešení pro jednoduché případy (např. laminární proudění v potrubí) ale pro převažující většinu praktických případů je

nutno řešení hledat pomocí numerické integrace. V CFD metodách se uzavřená řešená oblast rozdělí na konečný počet na sebe navazujících elementárních objemů nazývaných buňky. Pro každou buňku se sestaví soustava rovnovážných rovnic v algebraickém tvaru. Pro každou buňku se sestaví soustava algebraických rovnic popisujících hledaný parametr buňky – např. pro každou buňku je dána jedna teplota, tlak a vektor rychlosti. Hledaný parametr je funkcí sousedních buněk. Vezmeme-li jako příklad teplotu, lze říci, že teplota v dané buňce v daném časovém kroku je popsána teplotou v předchozím časovém kroku změněnou tepelnými toky mezi buňkou a všemi šesti sousedními buňkami dle následujícího vztahu,

$$T = \frac{(C_0 T_{01} + C_1 T_1 + C_2 T_2 + C_3 T_3 + C_4 T_4 + C_5 T_5 + C_6 T_6 + S)}{C_0 + C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6} \quad (1)$$

kde

C_n – součinitel sdílení tepla mezi řešenou buňkou a jejími sousedními buňkami

S – případný zdroj energie v buňce, okrajové podmínky

T_n – teplota v buňce

n – 0 pro výchozí stav, 1 až 6 pro sousední buňky

Označíme-li n počet buněk v řešené oblasti, pak je pro každou z pěti proměnných (teplota, tlak, rychlosti ve směru x, y, z) popisující stav tekutiny v dané buňce, nutno sestavit n rovnic, tzn. celkem $5n$ rovnic. Jednoduchá oblast s 224 buňkami je tak řešena soustavou 1120 rovnic, pokud se nepočítá s turbulentním prouděním. Běžně řešené problémy rozdělují oblast na desetitisíce až statisíce buněk. Z výše uvedeného lze nabýt dojmu, že se jedná o řešení lineárních rovnic, což bohužel ve většině případů není pravdou, neboť součinitelé, používané ve výpočtu jsou většinou funkcí proměnných a jejich výpočet vyžaduje provedení vnitřního iteračního výpočtu pro každou buňku.

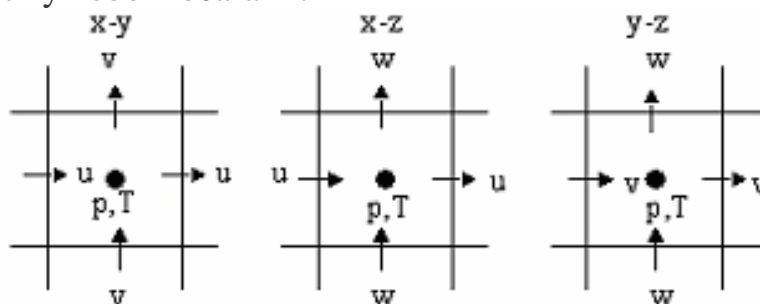
Vlastní výpočet je možné potom zjednodušeně popsat následujícími kroky:

- a) nastavení výchozího stavu – teplota, tlak, rychlost a směr proudění,
- b) stanovení součinitelů popisujících toky mezi buňkami,
- c) vyřešení soustavy lineárních rovnic pro teplotu, tlak a rychlosti,
- d) opakování iteračního výpočtu do dosažení rovnovážného stavu.

Přesnost výpočtu je závislá na počtu buněk, na který se řešená oblast rozdělí. Čím více buněk, tím je výpočet přesnější ale náročnější na strojový čas a stabilitu výpočtu. Dalším citlivým místem z hlediska výpočtu jsou okrajové podmínky, definující obálku řešené oblasti.

Výsledky výpočtu jsou vztaženy k jednotlivým buňkám a to tak, že skalární proměnné jako je teplota (T) a tlak (p) jsou umístěny ve středu buňky, vektory rychlostí (u, v, w) pak na stěnách buňky, jak je patrné z obr. 6. Vlastní výstup je pak ve formě tabulky výsledných hodnot v jednotlivých buňkách, častěji se

využívá grafického výstupu se zobrazením průběhu jednotlivých parametrů barevnými odstíny nebo izočárami.



Obr. 6 Umístění proměnných v řešené buňce

Kromě vysokých nároků na kapacitu počítače, danou množstvím požadovaných matematických operací bývá v CFD kritický i zvolený fyzikální model, popisující jevy související s turbulentním prouděním, což je při řešení inženýrských úloh téměř vždy. Existuje více modelů turbulence a výsledky jejich použití při řešení stejného případu se mohou diametrálně lišit.

Metodu CFD využívá celá řada výpočetních programů, které se od sebe odlišují především způsobem zadávání a formulace problému. Obecné programy, určené pro nejširší spektrum aplikací jsou univerzální, avšak způsob zadávání a popis jednotlivých prvků vyžaduje zkušenost zadávajícího. K těmto programům patří např. Fluent nebo esp-r [2]. Použití specializovaných komerčních programů je limitováno, nicméně obsahují knihovny již předem namodelovaných prvků, které urychlují práci a snižují riziko chybného zadání, i když i jejich použití vyžaduje hlubší průnik do řešené problematiky. Příkladem takového programu je Flovent, určený především pro řešení inženýrských problémů souvisejících s prouděním vzduchu v místnostech. Flovent obsahuje předdefinované typy vyústek, ventilátorů, stavebních prvků, databázi stavebních materiálů i prvků interiérových a usnadňuje tak zadání problému při zachování dostatečné variability.

Výsledky CFD výpočtů musí být bezpodmínečně vyhodnocovány kvalifikovanou osobou, neboť citlivost výpočtu na chybně nebo neúplně zadané vstupní parametry může vést k chybné interpretaci výsledků. SW využívající CFD metody jsou komerční produkty, které vyžadují proškolenou osobou trénovanou obsluhu.

2 Použití modelování a simulace energetického chování budov

Modelování a simulace energetického chování budov je moderní nástroj, který umožňuje analyzovat budovy z hlediska potřeby energie a předvídat jejich chování za různých provozních stavů. Tohoto nástroje lze použít na stávající i navrhované budovy. U stávajících budov je to použití především v oblasti energetických auditů, kdy pomocí simulace je možné vyhodnotit dopad navrhovaných úsporných opatření. Další možnou oblastí použití u stávajících budov predikce poruch systémů TZB pomocí simultánní simulace energetického

chování budov a porovnávání simulovaných a skutečných hodnot spotřeby energie.

U navrhovaných budov je použití modelu dáno okamžikem, kdy se počítačový model sestaví a použije. Využití je od koncepčního rozhodování na úrovni architektonické studie, kdy je možné měnit i základní parametry budovy jako je tvar, velikost oken, konstrukce i koncepční řešení systémů TZB [3] přes detailnější pohled na nestandardních řešení obvodových prvků budov [40] a jeho dopad na energetické chování budovy (např. dvojité fasády, Trombeho stěny, transparentní izolace) při daném koncepčním řešení budovy po optimalizaci provozní regulace vytápění a větrání budov v daném objektu [5]. Kromě vyhodnocení navrhovaného řešení z hlediska spotřeby energie je velmi často možné též analyzovat výsledný stav vnitřního prostředí z hlediska tepelného mikroklimatu [2].

- Počítačového modelování a simulace energetického chování budov je vhodné použít především v těchto případech:
- Tvorba podkladů pro koncepční rozhodování na úrovni architektonické studie (integrované modely budovy, energetického systému a provozu)[12];
- Modelování vlivu nestandardních řešení obvodových prvků budov (prosklené stavby, dvojité fasády, lehké budovy, nízkoenergetické budovy, řešení stavebních detailů) na energetické chování budov [16];
- Modelování nestandardních řešení prvků technických zařízení budov (přirozená klimatizace budovy, tepelná čerpadla, podlahové vytápění, hypokaustenické vytápění, chlazené stropy [21];
- Optimalizace nastavení provozní regulace vytápění a větrání budov [1];
- Analýza vlivu úsporných opatření na energetickou bilanci v rámci energetických auditů [11];
- Modelování vnitřního prostředí prostor - obrazy proudění, rozložení výsledné teploty [22];
- Výpočet rozúčtování provozních nákladů složitých provozních celků [34].

Aplikace užití metody numerické simulace na řešení problémů spojených s energetickými systémy budov je demonstrována na následujících dvou případových studiích.

2.1 Aplikace CFD při návrhu nízkoenergetického chlazení

2.1.1 Úvod

Optimalizace nevyhovujícího vnitřního prostředí v existujících nestandardních budovách je problematická zvláště v historických objektech. Jedním z těchto případů je Hala služeb v pražském Klementinu, kde díky užití moderních technologií a zpřísnujícím se požadavkům na vnitřní prostředí, došlo ke zhoršení pracovního prostředí zvláště v letním období. Příspěvek řeší případovou studii analýzy a aplikace nástrojů CFD pro vyhodnocení návrhu technického řešení sledovaného problému.

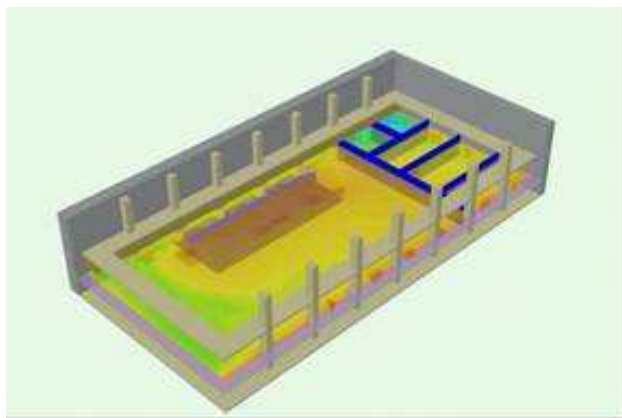


Obr. 7 Řešený prostor haly

2.1.2 Popis problému

Jedná se o řešení pracovního prostředí prostoru výpůjční haly pražského Klementina. Hala byla postavena na počátku 20. století a je řešena jako monolitická betonová hala se stropními světlíky o rozměrech 20x40x8 m. Ze dvou stran hala přiléhá ke komplexu historických budov. Světlíky jsou sedlové, zasklené dvouvrstvým makrolonem, v rovině stropu jsou zasklené mléčným sklem. V prostoru světlíku je instalováno umělé osvětlení zářivkovými svítilny, zajišťující z velké části osvětlení haly (obr.7).

Hala má nucené teplovzdušné větrání bez strojního chlazení. Mírné snížení teploty přiváděného vzduchu v letním období je zajištěno umístěním nasávacího otvoru ve stíněném prostoru Révového nádvoří a vedením přiváděného vzduchu podzemním vzduchovodem, předchůdcem dnes tak populárního zemního výměníku. Dlouhodobým problémem haly je její přehřívání v letním období, kdy stávající vzduchotechnika nestačí odvést tepelnou zátěž. Ta je z největší části tvořena vnějšími tepelnými zisky světlíky (v kritický den cca 140 kW) a v poslední době zvýšena o vnitřní zisky počítačů a kancelářské techniky (cca 15 kW). Tyto



Obr. 8 Model haly

rozhodující zátěže spolu se zvýšením důrazu na kvalitu pracovního prostředí způsobily, že stav se stal neúnosným a začalo se hledat řešení, které by přineslo zlepšení tepelně-vlhkostní složky pracovního prostředí v daném prostoru.

2.1.3 Analýza problému

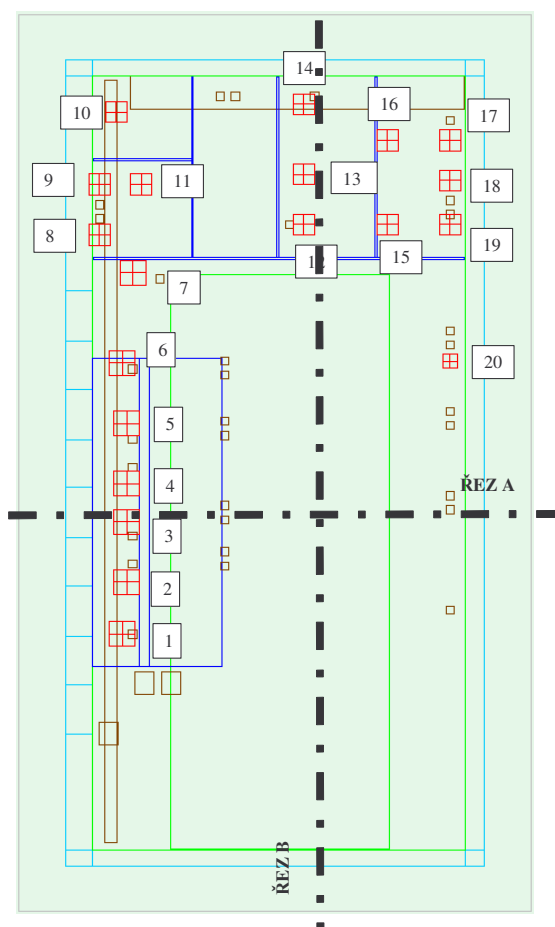
Snížení teploty v interiéru v letním období je možné několika způsoby

- snížením tepelné zátěže - zásahem do zdroje tepelné zátěže
- odvedením tepelné zátěže mimo pracovní oblast vzduchem nebo vodou.

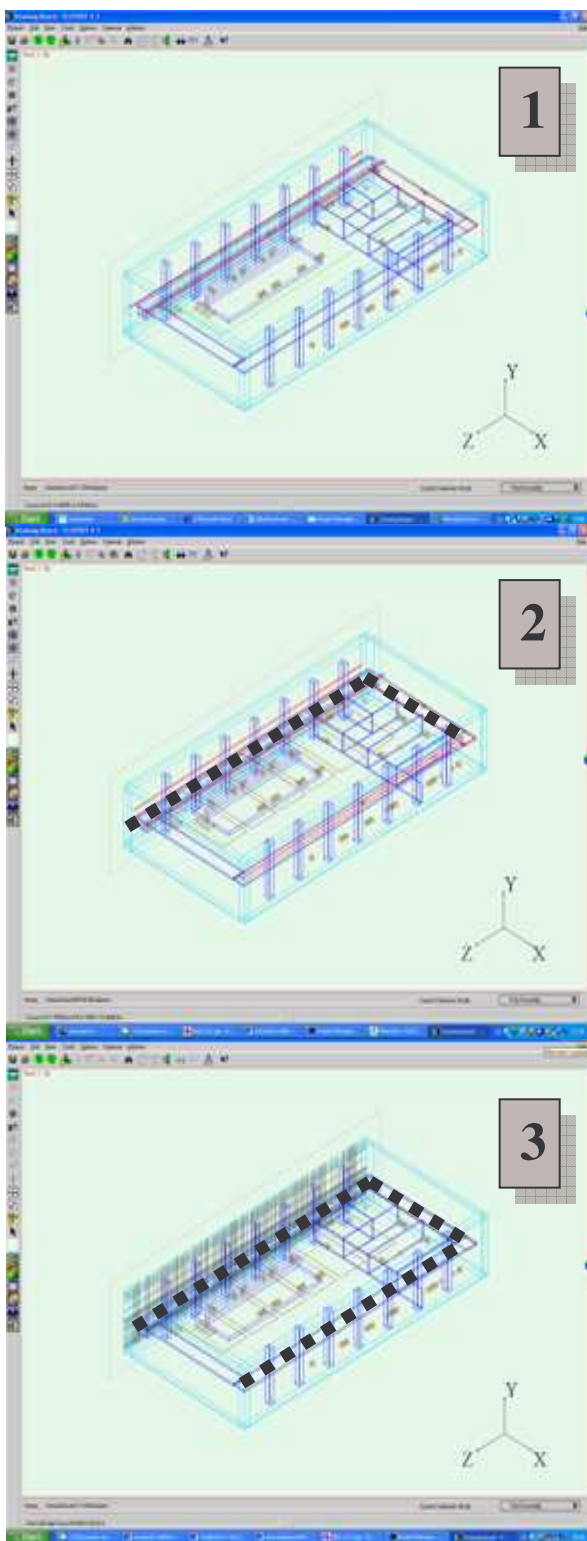
V prvním kroku bylo provedeno snížení tepelné zátěže instalací reflexních fólií na vnější zasklení světlíků se stínícím součinitelem $s = 0,4$. Po tomto kroku se tepelná zátěž z vnějšího prostředí snížila na cca 77 kW, což přineslo i snížení výsledné teploty v kritický den. Pro výpočet tepelné zátěže vnějšími vlivy byl pro míru detailu potřebnou pro řešení této úlohy postačující standardní výpočet tepelné zátěže. Přes tento zásah dosahovala teplota na pracovištích hodnot nad 28°C a tak bylo nutné přijmout další opatření, kterým je odvedení tepelné zátěže. Specifickým problémem daného prostoru jsou omezení daná charakterem a historickou hodnotou objektu, limitující zásah do stávajícího systému vzduchotechniky a rozmístění pracovních míst bezprostředně pod vyústkami přívodu vzduchu, znemožňující zvýšení průtoku vzduchu případně snížení jeho teploty, neboť proud přiváděného vzduchu zasahuje bezprostředně klíčová pracoviště v hale.

V druhém kroku bylo tedy, po vyloučení zásadního zásahu do systému vzduchotechniky, uvažováno s odvodem tepelné zátěže hydraulickým velkoplošným systémem. Po standardním výpočtu potřebné teplosměnné plochy, nutné k odvedení tepelné zátěže 77kW bylo zjištěno, že taková plocha nelze do daného prostoru umístit, a byla provedena detailnější analýza problému s cílem hledání realizovatelného a úspornějšího řešení.

Ve třetím kroku byly blíže specifikovány požadavky provozovatele na vnitřní prostředí a bylo stanoveno, že rozhodující je pracovní prostředí v místech stálých pracovišť, vyznačených na obr. 9 čísly v rámečkích. Většina stálých pracovišť se nachází při obvodu haly a jedná se především o počítačová pracoviště spojená



Obr. 9 Rozložení pracovních míst v hale



Obr. 10 Simulované alternativy umístění chlazených stropů

s knihovními službami. Na základě této analýzy byl proveden návrh na osazení chlazených stropů nad pracovní místa, limitovaný především geometrií prostoru (šířkou a délkou stávající galerie nad pracovišti) a byl vypočten maximální chladicí výkon, který takto instalované chladicí stropy mohou do prostoru předat. Tento výkon je celkem 6 kW, tzn. necelých 8% výpočtové tepelné zátěže. Otázkou, kterou standardní návrhový postup nevyřešil zůstalo, zda takto nízký chladicí výkon bude mít signifikantní účinek na zlepšení pracovního prostředí na daných pracovištích. Pro řešení tohoto problému bylo použito nástrojů počítačové simulace, konkrétně metody CFD.

2.1.4 Model

Pro detailní matematické modelování řešené situace bylo použito metody Computational Fluid Dynamics (CFD) aplikované v programu Flovent,[39] určeného pro řešení inženýrských úloh. CFD je založena na výpočtu teplotních a rychlostních polí při proudění tekutin metodou konečných prvků, která umožňuje modelovat děje související s prouděním tekutin současně se sdílením tepla, přenosem hmoty, fázovou změnou (např. odpařováním, táním..), chemickými reakcemi a mechanickým pohybem.

Předmětem matematického modelu [18] (obr. 8) a simulace bylo získání obrazu o poli teplot v hale služeb v Národní knihovně v letních měsících při stávajícím stavu a po instalaci chlazených stropů v prostoru pracovišť.

Ve výpočtu bylo použito stacionárního modelu se zohledněním turbulencí metodou K- ϵ , dále byla zohledněna radiace mezi jednotlivými povrchy. Ve výpočtu nebylo počítáno s ochlazením/ohřátím přiváděného vzduchu v přívodním vzduchovodu a uvažováno se sdílením tepla mezi klimatickým

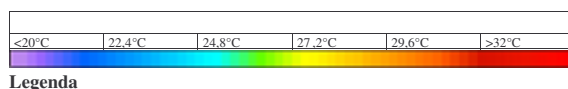
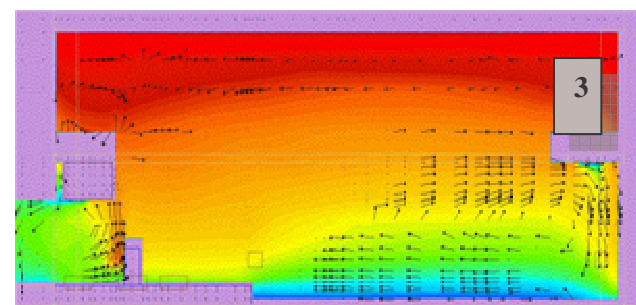
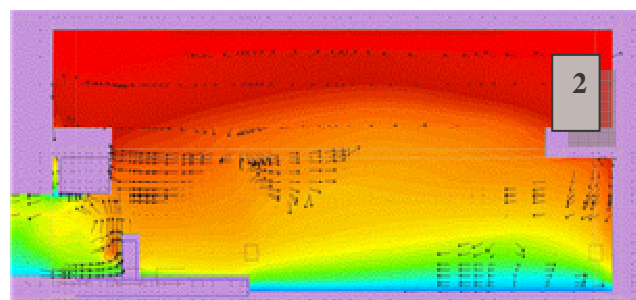
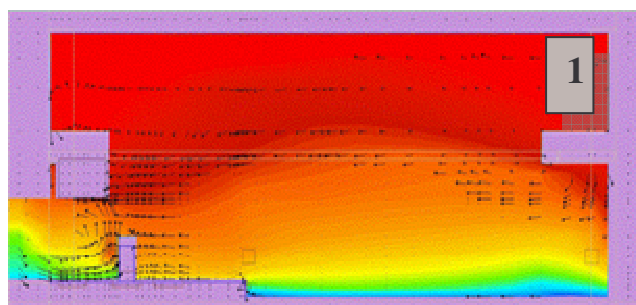
panelem a okolím z obou stran. Simulovaný prostor byl rozdělen na 122 240 výpočtových buněk, velikost rozměru buněk od 0,04 m do 6 m.

Ve všech simulovaných případech bylo počítáno s venkovní teplotou +32°C, teplota podloží byla uvažována +15°C. Teplota v přiléhajícím zázemí byla 25°C. Tepelně-technické parametry obvodových konstrukcí byly stanoveny na základě projektové dokumentace.

2.1.5 Simulované varianty

Ve výpočtu byl zohledněn by vliv slunečního záření ovlivňujícího vnitřní prostředí střešními světlíky. Z vnitřních zdrojů byly započteny počítače, každý představující tepelný výkon 300W, a kopírky s tepelným výkonem 800 W, v počtu a umístění dle zadání. Ve všech případech byl simulován kritický stav v hale při vypnuté vzduchotechnice. Vnitřní prostředí bylo vyhodnoceno v místech trvalých pracovních míst zaměstnanců Haly služeb. Simulace byla provedena pro 3 varianty řešení (obr.10).

- Varianta 1 – Výchozí stav. V hale nejsou instalovány žádné chladicí stropy.
- Varianta 2 – Instalace chladicích stropů v místě pracovišť. Druhý případ představuje stav po instalaci chladicích panelů pod galerií v místě pultu a pracovišť v zadní části haly. Ve výpočtu je uvažováno s osazením panelů o rozměru 0,6*35 m ve výšce 2,45 m nad podlahou, umístěným pod galerií nad půjčovním pultem a panelem o rozměru 1,6*15 m pod galerií v zadní části haly ve výšce 3,75 m nad podlahou. Povrchová teplota panelů byla uvažována konstantní 19 °C.
- Varianta 3 – Instalace chladicích stropů v místě pracovišť a pod galerií naproti výpůjčnímu pultu. Tento případ představuje rozšíření 2 varianty o instalaci chlazených stropů pod galerií na straně naproti půjčovnímu pultu. Chlazené stropy jsou instalovány



Obr. 11 Vyhodnocení výsledné teploty v příčném řezu halou

pod galerií v místě pultu a pracovišť v zadní části haly. Ve výpočtu je uvažováno s osazením panelů o rozměru 0,6*35 m ve výšce 2,45 m nad podlahou, umístěným pod galerií nad půjčovním pultem, panelem o rozměru 1,6*15 m pod galerií v zadní části haly ve výšce 3,75 m nad podlahou a panelem o rozměru 0,6 *36 m ve výšce 3,75 m nad podlahou pod galerií naproti půjčovnímu pultu. Povrchová teplota panelů byla uvažována konstantní 19 °C.

2.1.6 Výsledky simulace

Výsledek simulace CFD je soubor dat, popisující teploty a vektory rychlostí proudění vzduchu v jednotlivých uzlech sítě pro každý řešený případ.

Pro účely této analýzy bylo použito interpretace výsledků výpočtu grafickou formou porovnáním jednotlivých variant, která nejefektivněji zobrazuje výsledná data.

Pro vyhodnocení tepelné pohody v objektech se sálavými plochami je rozhodující výsledná teplota – teplota, která zohledňuje jak teplotu vzduchu, tak povrchovou teplotu okolních ploch a dává tak přesnější informaci o skutečném vnímání prostředí osobami na pracovištích. Zobrazení výsledné teploty je na obr.11 v charakteristických příčných řezech.

V grafech na obr.12 je zobrazeno porovnání teploty vzduchu v monitorovaných bodech (v místech pracovišť) při třech variantách výpočtu.

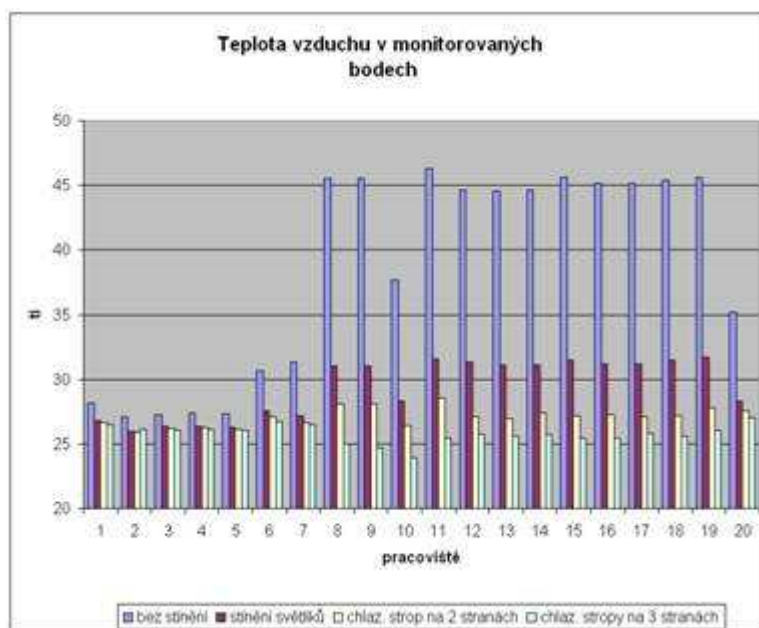
2.1.7 Technické řešení

Pro zajištění požadovaného zlepšení komfortu v interiéru haly služeb v letním období bude použito kombinace stávající vzduchotechniky a místního chlazení klimatickým stropem.

Po realizaci zastínění světlíků reflexními fóliemi se součinitelem stínění $s=0,4$ je tepelná zátěž haly stanovená dle ČSN 730548 Výpočet tepelné zátěže klimatizovaných prostorů 77,5 kW.

Chlazený strop zajistí snížením operativní teploty zlepšení mikroklimatických podmínek v místě stálých pracovišť i při vyšší teplotě vzduchu v extrémních podmínkách tak, jak prokázal výpočet na matematickém modelu.

Chlazený strop je navržen



Obr. 12 Vyhodnocení teploty vzduchu na pracovištích

- a) pod galerií nad půjčovním pultem rozměr 0,6*38 m
- b) pod galerií v zadní části haly 1,6* 16 m
- c) pod galerií vpravo 0,6*36 m

Výkon chlazeného stropu je limitován povrchovou teplotou, která nesmí poklesnout pod teplotu rosného bodu. Při běžných podmínkách letního provozu se teplota rosného bodu pohybuje v závislosti na relativní vlhkosti vzduchu kolem 16°C. Při střední teplotě stropu 18,5°C a vnitřní teplotě 26°C je výkon stropu dle měření výrobce cca 85 W/m². Při ploše stropu 70 m² je celkový výkon 5,95 kW. Rozvod chladu je řešen jako hydraulická soustava s nuceným oběhem s teplotním spádem 17/20°C. Průtok teponosné látky při těchto parametrech činí 1700 kg/hod, tlaková ztráta stropů se navrhuje do 25 kPa. Pro rozvod bude použito plastových trub.

Zdrojem chladu bude stabilní přírodní zdroj podzemní vody, vydatnost 1,7 m³/hod, teplota do 17°C s možností vypouštění stejného množství vody nebo tepelné čerpadlo vzduch-voda o příkonu 6 kW. Kondenzátor čerpadla bude umístěn vně budovy na střeše haly, případně po provedeném průzkum bude ohřátý vzduch z čerpadla smíchán se vzduchem odváděným z haly. Odváděný tepelný výkon je cca 9 kW.

2.1.8 Závěr

Zpracovaný matematický model byl sestaven s cílem zjistit vliv synergického působení tepelné radiace a konvekce na výsledný stav vnitřního prostředí v halovém objektu z hlediska operativní teploty a teploty vzduchu na místně určených pracovištích porovnáním stávajícího stavu se stavem projektovaným, který byl řešen ve dvou variantách umístění chlazeného stropu. Použitá metoda CFD (computational fluid dynamics) dává obraz o prostorovém rozložení teplot a vektorů rychlosti proudění vzduchu ve sledovaném interiéru. V tomto případě bylo použito statického modelu, kdy byly uvažovány výpočtové vnější podmínky používané pro návrh klimatizace v letním období, kdy byl zahrnut vliv vnější teploty vzduchu a solárního záření pro 21.7. ve 12:00, dále vliv skutečnosti, že podlaha je na terénu a severní stěna přiléhá ke komplexu masivních budov Klementina. Z hlediska vnitřních zdrojů byly ve výpočtu uvažovány tepelné zisky kancelářské techniky a obsluhy (počítače a kopírky) rozmístěné dle zadání investora. Cílem modelu byla analýza působení chlazených stropů na lokální mikroklima v kritickém stavu a proto bylo uvažováno se stavem, kdy stávající vzduchotechnika (řešená pouze pro větrání bez strojního chlazení) se nepodílí na zlepšení tepelné bilance posuzovaného prostoru.

Testované varianty – umístění chlazeného stropu po 2 nebo 3 stranách haly pod galeriemi - jednoznačně prokazují vliv na snížení výsledné teploty na pracovištích haly služeb NK ČR při výpočtových podmínkách letního období. Varianta 2 – umístění chlazeného stropu po 3 stranách haly pod galeriemi vykazuje lepší rozložení teplot a výraznější snížení tepelné zátěže na sledovaných pracovištích. Ve sledovaných místech dochází vlivem negativní

radiace chlazených stropů ke snížení operativní teploty (viz obr 11) i ke snížení teploty vzduchu vlivem konvekčních proudů tak, že na monitorovaných bodech vychází při výpočtových podmínkách maximální teplota vzduchu 26,9°C.

Nutno upozornit na skutečnost, že toto řešení nezajišťuje eliminaci tepelné zátěže, snížení operativní teploty a tepelnou pohodu v celém prostoru haly, ale že se jedná o místní zlepšení podmínek na specifikovaných pracovištích haly tak, aby se pracovní prostředí přiblížilo k požadavkům NV 178/2001, kde je stanoveno, že na uzavřených pracovištích musí být zajištěna pro letní období operativní teplota 20-28°C při rychlosti proudění vzduchu 0,1-0,2 m/s.

Předností tohoto řešení jsou nízké energetické nároky na zdroj chladu, jehož chladicí výkon nepřesahuje 6 kW, což je cca 7,7 % celkové tepelné zátěže prostoru haly, která po zastínění světlíků činí cca 77 kW.

2.2 Aplikace dynamického modelu pro porovnání systémů klimatizace na úrovni koncepčního rozhodování

Tato studie je zaměřena na aplikace dynamického modelu interakce budovy se systémem klimatizace v celoročním provozu s cílem stanovení citlivosti základních parametrů energetické náročnosti a environmentální zátěže na volbu systému klimatizace[50]. Ve studii byly porovnány dvě varianty řešení a pro modelování bylo použito nástroje DesignBuilder, jehož výpočetním jádrem je EnergyPlus.

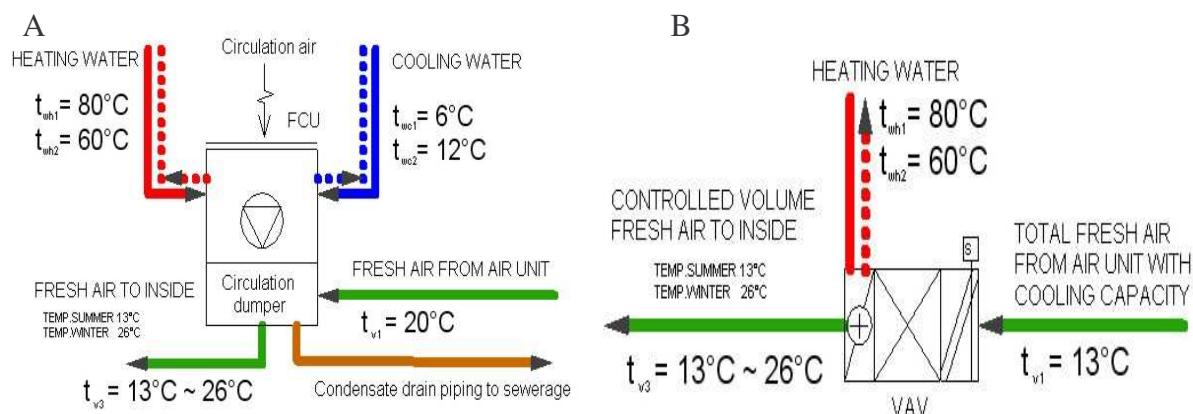
2.2.1 Popis objektu

Jedná se o moderní administrativní budovu určenou pro běžné kancelářské práce s celoročním provozem a pracovní dobou 8-18 hod v všední dny. Je požadováno dodržení parametrů vnitřního prostředí v zimním i letním období na úrovni plně klimatizované budov. Objekt je řešen formou dvou k sobě přiléhajících bodových výškových budov s výškou 15 a 18 podlaží se třemi komunikačním jádry, umístěnými ve středu dispozice každé z věží a v místě spojovacího krčku mezi věžemi. Zbytek půdorysu tvoří velkoplošné kanceláře a studia, pronajímatelné po jednotlivých podlažích. Prostor kanceláří může být rozdělen přemístitelnými příčkami. Obě věže jsou podsklepené čtyřmi podzemními podlažími nevytápěných garáží.

Objekt je umístěn v městské zástavbě, k dispozici je elektrická energie, zemní plyn a centralizované zásobování teplem horkou vodou s parametry 130/80 v zimě a 80/60 v létě.



Obr. 13 Pohled na studií řešený objekt



Obr. 14 Varianty řešení studie. A) fancoil, B) Variable Air Volume

2.2.2 Řešené varianty

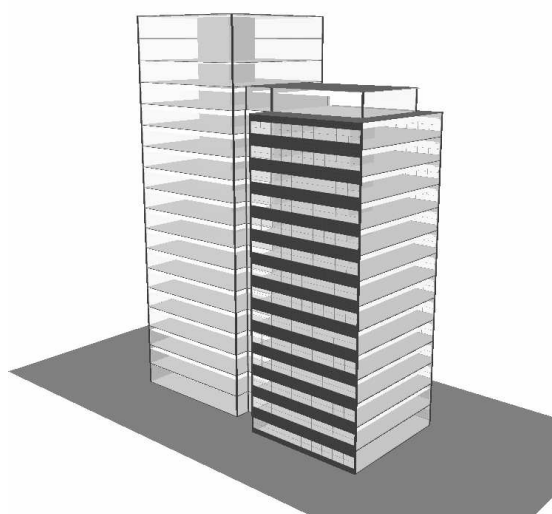
Byly navrženy dvě varianty řešení klimatizace objektu a to systém s koncovými vzduchotechnickými jednotkami (fancoil units – FCU) a systém s proměnným průtokem vzduchu (Variable air volume VaV).

2.2.3 Modelování a simulace

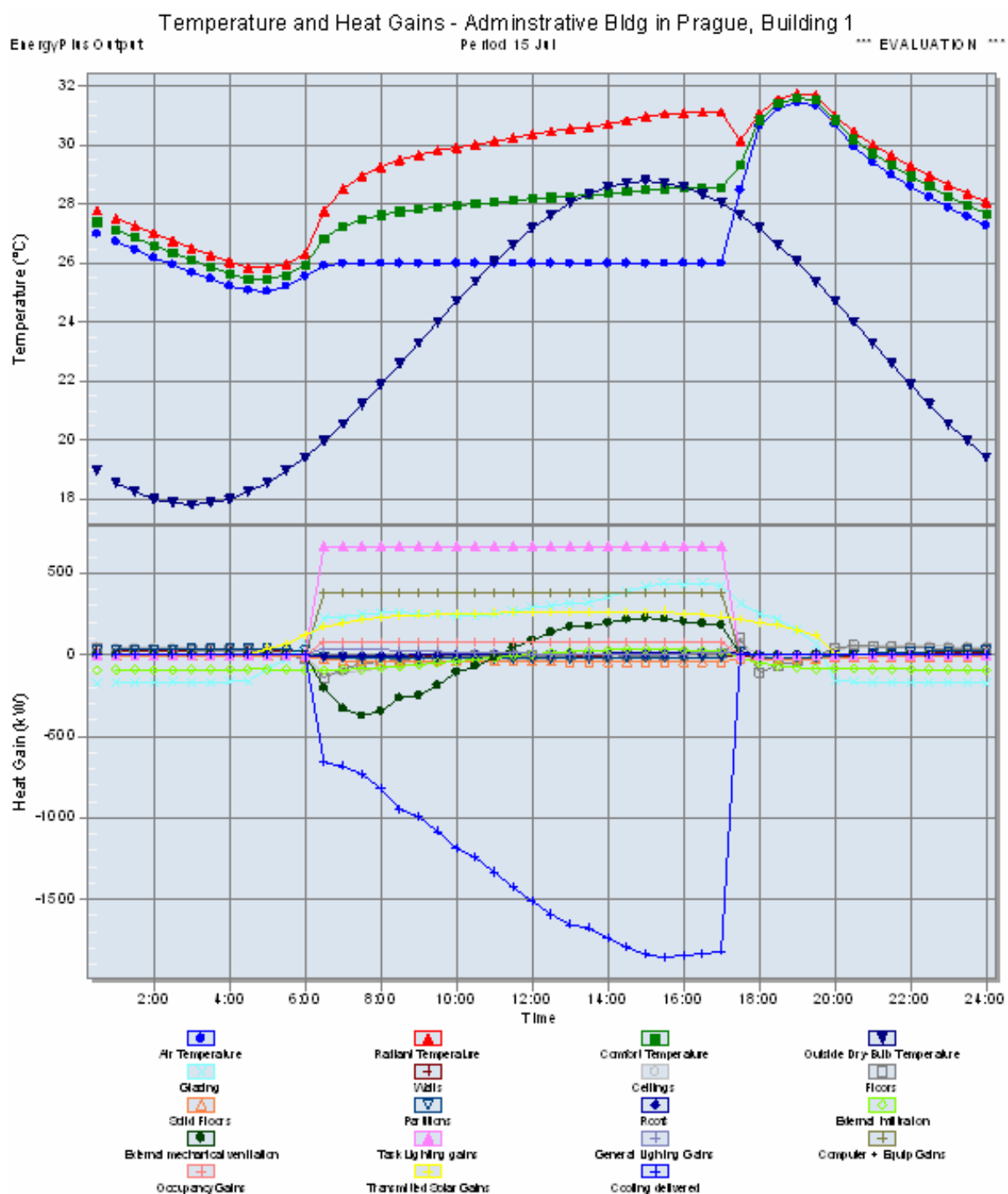
V prostředí Design Builder byl vytvořen geometrický model budovy s danými parametry obvodových konstrukcí a provozním režimem. Design Builder umožňuje simultánní výpočet potřeby energie budovou i její pokrytí energetickým systémem a tak byl obě varianty řešeny postupně. Pro simulaci ročního provozu bylo použito klimatických dat ASHRAE pro Prahu, která v dostatečné podrobnosti pro tento typ výpočtu simulují roční průběh počasí v dané lokalitě. Pro kontrolu geometrie zadání budovy je zobrazen 3D model, kontrola zadání systému se provádí na základě numerických hodnot.

Výsledkem roční simulace provozu objektu jsou průběhy teplot a energetických toků po jednotlivých prvcích zadaného objektu s možností integrace po jejich skupinách a pro celou budovu v zadaných časových úsecích.

Pro vyhodnocení letního provozu a ověření správnosti zadání a funkčnosti jednotlivých kontrolních funkcí je cenným výstupem denní průběh teplot a energetických toků pro kritický letní den (obr. 16), ze kterého je možno potvrdit správně nastavenou regulaci, udržující teplotu vzduchu v místnosti na $+26^{\circ}\text{C}$ v pracovní době a správně zadané provozní režimy vnitřních tepelných zdrojů.

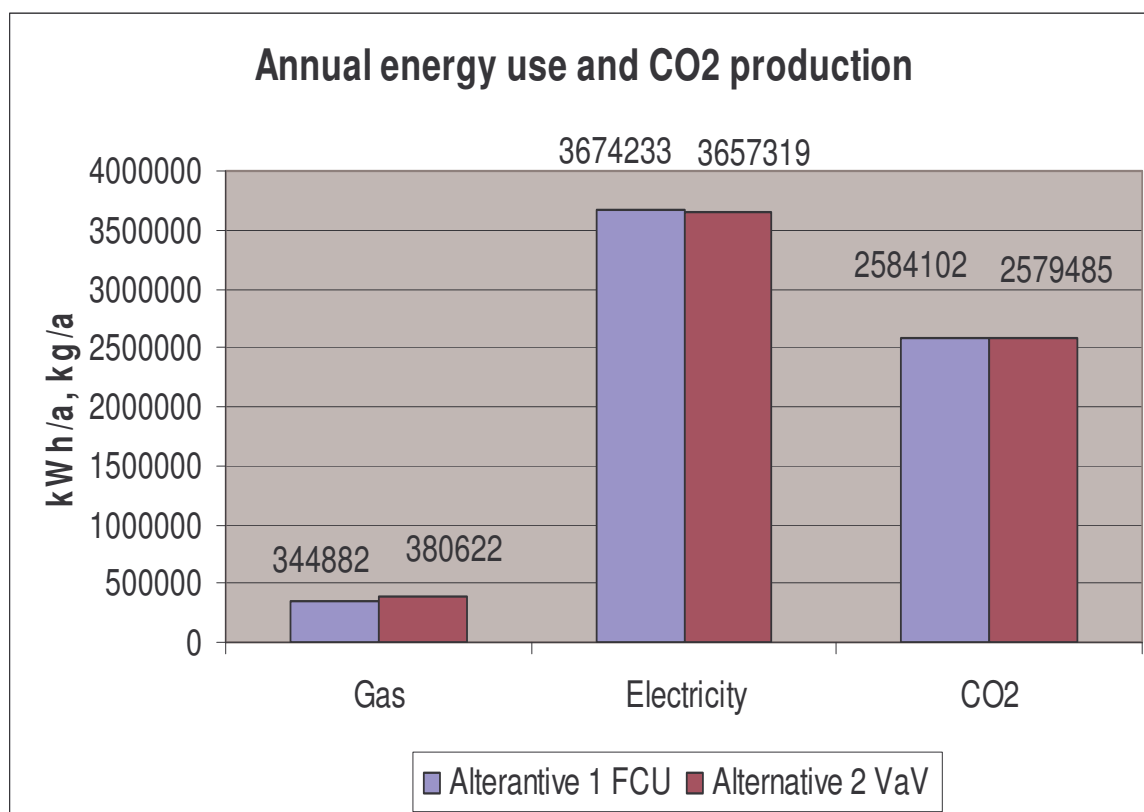


Obr. 15 Model budovy v prostředí Design Builder



Obr. 16 Denní průběh teplot a energetických toků

Po ověření funkčnosti modelu je možné přistoupit k vyhodnocení měsíčních a ročních potřeb energií, v tomto případě přepočtených až na úroveň množství energie v odebraném palivu – zemním plynu a elektřině (obr.17).



Obr. 17 Roční potřeba paliva a produkce CO₂

2.2.4 Závěr

Použitý model byl dostatečně citlivý na to, aby dokumentoval vliv volby systému klimatizace na celkovou potřebu paliva a produkci CO₂. Dle předpokladů, hlavní rozdíl je dán rozdílnou účinností regulace obou systémů a především rozdílnou potřebou tzv. obslužné energie (na pohon ventilátorů, čerpadel). Z hlediska energie na chlazení se výhodnější jeví systém VaV, který vykazuje o 3% nižší spotřebu energie než systém FCU. Z hlediska vytápění vychází příznivěji systém FCU se spotřebou o 11% nižší než má systém VaV. Z hlediska produkce CO₂, která odráží celkovou potřebu energie, je rozdíl zanedbatelný. Na základě této analýzy bylo doporučeno pro další rozpracování použití systému FCU.

3 Perspektivy

V pohledu vývoje stavitelství, jsme v současnosti v oblasti použití numerického modelování a simulací energetického chování budov přibližně v 25 roce systematického vývoje, což z historického hlediska představuje úplný začátek vývoje. Je potěšitelné, že generace zakladatelů této oblasti našla dostatek následovníků, kteří navazují na základy a budují dál virtuální svět, jímž se stále více obklopujeme. Za uplynulé období došlo k velkému pokroku ve vlastních výpočetních algoritmech, ve zjednodušení způsobu zadávání a v neposlední řadě zvyšujícím se výkonem počítačů zrychlením práce. Poměrně dobře jsou

propracovány diskrétní modely (jednotlivé prvky a dílčí úlohy), ve vývoji je stále modelování systémů a jejich interakcí s budovou.

Perspektivní oblastí je provázání numerického modelu s řídicím systémem budovy, kdy numerický model může být referenčním výchozím nastavením a na základě zpětné vazby z provozu se bude model a řídicí systém sám učit, jak s energií lépe hospodařit. Zpracovávají se i projekty na propojení předpovědi počasí pro danou lokalitu na řídicí systém budovy, Těžiště zájmu se tak přesouvá i do oblasti provozování budov, jak dokládají priority Evropské komise vyjádřené směrnicí Energy performance building directive z roku 2002.

Další oblastí perspektivního vývoje jsou zátěžová data určená pro výpočty. Jedná se nejen o klimatická data, kde Česká republika stále nemá jednotný referenční rok ale i data simulující provoz budov. V této oblasti se nadějně jeví využití stochastických modelů lidského chování a modelování vlivu urbanizovaných oblastí na skutečné průběhy teplot, kde dosavadní výsledky ukazují značné podhodnocení vlivu zástavby na zvýšen tepelné zátěže v letním období (heat islands).

V neposlední řadě je nutné zohlednit nejnovější trendy v hodnocení budov, kdy nepostačuje již pouze hodnocení provozní energetické náročnosti ale přihlíží se k hodnocení v celém životním cyklu.

4 Poděkování

Autor vycházel z prací, prováděných v rámci výzkumných úkolů a grantů, zejména Výzkumného záměru CEZ MSM 6840770003,CEZ J04/98, 210000005, CEZ J04/98 21000011, dále pak projektu 5.FP EU – ENK6-CT-2000-00319 Smarthomes a projektu 5.FP EU NNE5-2001-00753 SUNToolSustainable Urban Neighbourhood Tool. Poděkování patří též kolegům z katedry – prof. Ing. Miloslavu Joklovi, DrSc., doc. Ing. Karlovi Papežovi, CSc., Ing.Zuzaně Veverkové, Ph.D., Ing.Michalovi Kabrhelovi, Ph.D., Ing.Stanislavu Frolíkovi,Ph.D. a současným doktorandům Ing.Pavle Dvořákové, Ing.Petru Kotkovi, Ing.Romanu Musilovi, Ing.Danu Adamovskému, Ing.Miroslavu Urbanovi, Ing.Haně Doležilkové a všem dalším členům výzkumného týmu.

5 Použitá literatura

- [1] Clarke J.A.: Energy Simulation in Building Design ISBN 0-85274-797-7, 1985 Bristol
- [2] ESRU: ESP-r A Building Energy Simulation Environment; User Guide Version 9 Series, ESRU Manual U96/1, University of Strathclyde, Energy Systems Research Unit, Glasgow. 1996
- [3] Forrest I. D.: Electrical Analogues:Theory, development and Application - MSc Thesis Un.of Strathclyde 1979

- [4] Hensen, J.L.M.: On the thermal interaction of building structure and heating and ventilating system, Doctoral dissertation Eindhoven University of Technology (FAGO). (ISBN 90-386-0081-X) 1991.
- [5] Kabele K., Hensen J.: Application of System Simulation to WCH Boiler Selection. in Proc. Building Simulation '97, Vol.II pp. 141-147, International Building Performance Simulation Association IBPSA, Praha 1997.
- [6] Laret, L.: Accurate boiler models for large scale simulation, in Proc. Building Simulation '89, pp. 375-380, International Building Performance Simulation Association IBPSA, Vancouver, 1989
- [7] Moos,P.: Informační technologie,ČVUT Praha 1993
- [8] SEL: TRNSYS, a transient system simulation program, University of Wisconsin-Madison, Solar Energy Laboratory, Madison, WI. Manual for version 14.1 and later, 1994
- [9] Vytlačil, D.: Matematický simulační model tepelných dynamických procesů budov a energetických systémů. Kandidátská disertační práce : Č.věd.ob.36-01-9. Dat.ob.15.02.1994. - Praha : CVUT FSv, 1994. - 165 s.
- [10] Zienkiewicz, O. C.: The Finite Element Method, New York, McGraw-Hill, 1989
- [11] Kabele,K.: Aplikace počítačového modelování a simulace ve výuce energetického auditu na FSV, Mezinárodní vědecká konference 6. Výročí stavební fakulty STU v Bratislave18.-20.11 1998, 1998
- [12] Kabele K., Kadlecová M., Matoušovic T., Centnerová L.: Application of complex energy simulation in competition design of Czech embassy in Ottawa, Proc. Building Simulation 99, vol II pp 249-255, International Building Performance Association IBPSA , Kyoto 1999, ISBN 4-931416-01-2, 1999
- [13] Kabele, K., Kadlecová, M. ,1999 : Building Energy Performance Simulation in Energy Audit Process. In First International Conference on Advanced Engineering Design, pp 202, ČVUT, University of Glasgow, Engineering Academy of the Czech Republic, Praha 1999
- [14] Drkal F., Dunovská T.: Vliv nepřesnosti vstupních údajů na přesnost výsledků počítačové simulace v technice prostředí, Závěrečná zpráva FRVŠ 801/G1/1999, Praha 1999

- [15] Kabele K.: Modelování a simulace energetických systémů budov 1. Úvod. Topenářství - instalace, 1, s 64-66. ISSN 1211-0906, 2000
- [16] Kabele K.: Modelování a simulace energetických systémů budov 2. Aplikace počítačové simulace při optimalizaci koncepčního řešení otopné soustavy, Topenářství - instalace, 2, s 50-52.,ISSN 1211-0906, Praha 2000
- [17] Kabele K.,Kadlecová M.: Modelování a simulace energetických systémů budov 3. Aplikace počítačové simulace energetického chování v architektonickém návrhu budovy, Topenářství - instalace, 3, s 48-52.,ISSN 1211-0906, Praha 2000
- [18] Kabele, K. - Dvořáková, P.: Computer Aided Optimization of Local Cooling Design. In 8th REHVA World Congress Clima 2005 [CD-ROM].Laussane:, Rehva, 2005.
- [19] Kelly, N. J., Clarke J.A.: The Simulation of Building Electrical Power Flows, in Proc. 6th International IBPSA Conference Building Simulation '99 in Kyoto, Vol. II, pp. 715-722, International Building Performance Simulation Association, 1999.
- [20] Centnerová L.2000: Simulace tepelné pohody. Sborník 1. národní konference Simulace budov 2000,pp.13-16, Praha 28.9.2000, IBPSA CZ,2000 ISBN 80-02-01375-1
- [21] Kabele K.: Aplikace počítačové simulace při řešení teplovzdušného vytápění nízkoenergetického domu. Sborník 1. národní konference Simulace budov 2000,pp.65-72, Praha 28.9.2000, IBPSA CZ,2000, ISBN 80-02-01375-1, 2000
- [22] Krtková, Z., Kabele, K.: Možnosti využití simulačního programu ESP-r pro výpočet střední radiační teploty. Sborník 1. národní konference Simulace budov 2000,pp.96-101, Praha 28.9.2000, IBPSA CZ,2000, ISBN 80-02-01375-1, 2000
- [23] Kabele,K.,Kadlecová,M.,Krtková,Z.:Application of the computer simulation in warm-air heating system design in low-energy buildings, Proceedings of the 4th international conference Energy for Buildings , 21.9-22.9.2000,pp 271-287, Vilnius, Litva.,ISBN 9955-401-54-0, 2000
- [24] Sars, G., Pernot, C., de Wit, M.: ESPmrt, a new module for the ESP-system, University of Technology Eindhoven, Institute of Applied Physics TNO-TH, Eindhoven, 1988

- [25] Fanger, P.O.: Thermal comfort , McGraw-Hill, New York 1972
- [26] Jokl, M.: Zdravé obytné a pracovní prostředí. 1. vyd. Praha: Academia, 2002. 262 s. ISBN 80-200-0928-0.
- [27] Kabele,K., Kabrhel, M. Krtková, Z.: Aplikace počítačové simulace ve návrhu vytápění a větrání nízkoenergetického bytového domu 7.mezinárodní konference EEBW Úspory energie 17.až 19. října 2000, Praha , Kongresové centrum SEVEN, 2000
- [28] Hensen, J., Centnerova L., Energy simulation of traditional vs. adaptive thermal comfort for two moderate climate,. Moving Thermal Comfort Standards into the 21st Century, Windsor, UK 2001
- [29] Bašta,J., Kabele K.:Otopné soustavy teplovodní Sešit projektanta č.1, Společnost pro techniku prostředí, Praha, ISBN 80-02-01426-X,2001
- [30] Kabele K.:Modelování a simulace energetických systémů budov 5.“Modelling and simulation of building energy systems 5 Topenářství - instalace, 2/2001, s 60-63 .ISSN 1211-0906 VZ 05,11,2001
- [31] Kabele K.: Požární větrání administrativní budovy Century Tower v Tokiu. Fire ventilation in office building Century Tower. Vytápění, větrání, instalace 5/2001, s. 35-38, STP 2001
- [32] Kabele K.: Heating Systems in Low-Energy Buildings Proceedings of the 2nd international seminar on ECS , 24-25.May 2001, Prague, IASS working group 18,ISBN 80-01-02473, VZ 3405125,2001
- [33] Kabele,K.,Krtková,Z.: Computer modelling of infrared radiant heating in large enclosed spaces, Proceedings of the 7th international IBPSA conference Building Simulation , pp 559-564, Rio de Janeiro, Brazílie 12.8.-15.8.2001, ISBN 85-901939-2-6 60%,40% VZ 3405125,2001
- [34] Kabele,K.Centnerová,L.,Krtková,Z.:Use of energy performance simulation for operation cost distribution in multipurpose conventional centre, Proceedings of the 7th international IBPSA conference Building Simulation , pp 547-552, Rio de Janeiro, Brazílie, 12.8.-15.8.2001, ISBN 85-901939-2-6 , 60%,20% 20% VZ 3411125,2001
- [35] Kabele,K: Co umožňuje inteligentní rodinný dům? Sborník přednášek semináře Vytápění rodinných domů, , Společnost pro techniku prostředí , 25.10.2001, Praha 2001, ISBN 80-02-01457-X VZ 3411125,2001

- [36] Dahlsveen,T., Petráš,D.: Energetický audit budov, Jaga Bratislava,1996 ISBN 80-967095-9-3
- [37] Ashrae: Handbook - 2000 HVAC System and Equipment - Chapter 6 – Panel Heating and cooling, Atlanta, 2000
- [38] Petráš, D.: Low-temperature combined heating for sustainable low-energy buildings, SSTP 2001., 4th.international, conference Indoor climate of buildings 2001
- [39] Flomerics (2001), FLOVENT – Introduction to Version 3.2 – Tutorial., Flomerics: <http://www.flovent.com/>
- [40] Fluent incorporated: Fluent. <http://www.fluent.com>
- [41] Kříž,J, Trejtnar L.,Horáček P.: Software pro návrh a simulaci HVAC systémů. Sborník z konference AUTOS2000, 14.-15.června 2000, Plzeň, 2000
- [42] Frolík, S., Hodnocení energetických a ekologických systémů budov, doktorská distertační práce, ČVUT v Praze, 2005
- [43] Kabrhel. M., Akumulace tepla v energetických systémech budov, doktorská distertační práce, ČVUT v Praze, 2004
- [44] Veverková, Z., Modelování vnitřního prostředí v sálavě vytápěných objektech, doktorská distertační práce ,ČVUT v Praze, 2004
- [45] Reinberk,Z., Vzdálené řízení a monitorování energetických systémů budov, doktorská distertační práce ČVUT v Praze, 2005
- [46] <http://new.archiweb.cz/>
- [47] <http://www.pearcemccomish.com/eastgate.htm>
- [48] <http://www.svn.cz/cz/budovy/susice.htm>
- [49] Kabele, K., Modelování energetického chování systémů budov. Habilitační práce. ČVUT v Praze, 2002
- [50] Kotek, P. - Kabele, K.: Vliv systému TZB na vnitřní prostředí klimatizovaných budov. In Zborník prednášok Vnútorňa klíma budov 2005. Bratislava: Slovenská spoločnosť pro techniku prostredia, 2005, s. 180-187. ISBN 80-89216-05-6

Doc.Ing.Karel Kabele, CSc.

Datum narození 5.října 1960, Praha

Vzdělání: 1967-1969 ZDŠ Praha 5

1969-1975 ZDŠ s rozšířenou výukou jazyků Praha 5

1975 - 1979 Gymnázium Budějovická v Praze 4

1979 - 1984 Ing ČVUT Fakulta stavební, obor Pozemní stavby, specializace Teorie a technika tvorby vnitřního prostředí budov

1991 Průkaz zvláštní způsobilosti pro činnosti v investiční výstavbě

1995 Autorizovaný inženýr v oboru Technika prostředí

staveb

1998 **CSc.** Kandidátská disertační práce na téma Optimalizace vnitřního prostředí budov

1999 Autorizovaný inženýr v oboru Energetické auditorství

2002 **doc.**Habilitace na ČVUT Fakultě stavební v oboru Teorie a konstrukce pozemních staveb, téma Modelování energetického chování budov

2003 Energetický auditor MPO ČR dle zákona 406/2001

Zaměstnání

1984 OSP Jindřichův Hradec – projekce vytápění (v rámci

ZVS)

1984-1987 pedagogický asistent ČVUT Fakulta stavební, katedra Technických zařízení budov

1987- 2002 odborný asistent tamtéž.

2002 – docent tamtéž. Garant předmětů Energetický audit, Otopné soustavy, Počítačové modelování systémů TZB, Building services systems 10,20 (v angličtině), Modelling and simulation for environmental engineering, vedoucí diplomových prací, školitel doktorandského studia. Přednášky TZ20 (vytápění), TZ10 (Zdravotní technika)

2004 – vedoucí katedry TZB Fakulty stavební ČVUT v Praze

Další aktivity

1992 – člen redakční rady časopisu Topenářství

1994 – člen výboru odborné sekce vytápění Společnosti pro techniku prostředí

1994-98 nositel 3 interních grantů ČVUT

1997 – člen akademického senátu FSv ČVUT

1997 – místopředseda zkušební komise specializace Technika prostředí staveb České komory autorizovaných inženýrů a techniků

- 1998 – člen American Society of Heating, Air-conditioning and Refrigerating Engineers (ASHRAE)
- 1999 – místopředseda společnosti IBPSA-CZ
- 1999 – nositel grantu FRVŠ
- 1999 – místopředseda zkušební komise specializace Energetické auditorství České komory autorizovaných inženýrů a techniků
- 1999 – Předseda Společnosti pro techniku prostředí
- 1999 – člen mezinárodního výboru organizace IBPSA
- 1999 – člen redakční rady časopisu Vytápění, větrání, instalace
- 2000-2005 nositel 2 grantů 5.RP Evropské unie – Smarthomes, SUNtool
- 2001 – zástupce ČR v REHVA, evropské asociaci společností pro techniku prostředí
- 2003 – člen akademického senátu ČVUT
- 2005 – člen redakční rady mezinárodního časopisu Energy & Building

Jazykové schopnosti : angličtina, pasivně němčina a ruština

Rodinné poměry: ženatý, 2 synové Jan (1987) a Tomáš (1990)