

Řízená akumulace tepla pro chlazení budov

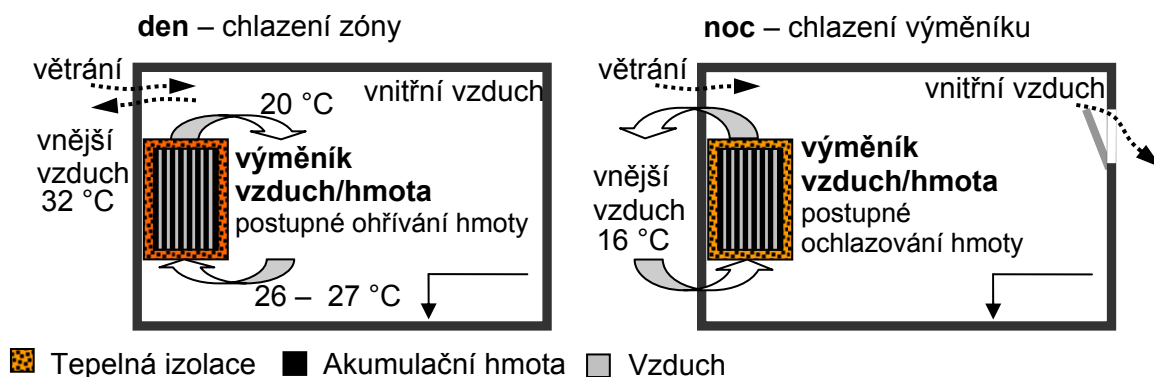
Pavel Kopecký, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra konstrukcí pozemních staveb, pavel.kopecky@fsv.cvut.cz

Úvod

Budoucí systémy vytápění a chlazení budov se budou muset stále více orientovat na přírodní zdroje energie, jako například venkovní vzduch nebo zeminu. Pro klimatické podmínky ČR je venkovní vzduch v letním období dostatečně chladný pouze v nočních hodinách. Pro využití nočního vzduchu ke chlazení budov během dne je proto potřebná krátkodobá akumulace „chladu“. Obvyklým způsobem takové akumulace je noční předchlazení stavebních konstrukcí uvnitř budovy. Podstatnou nevýhodou je obtížná říditelnost a pomalost tohoto procesu, poněvadž přestup tepla spoléhá na přirozenou konvekci.

Možnou eliminací této nevýhody by mohlo být využití řízené akumulace tepla pomocí výměníku vzduch/hmota (viz obrázek 1). Jeho princip je založen na střídání nuceného ohřívání hmoty výměníku (odvedení denních tepelných zisků) a ochlazování hmoty (vyrovnání energetické bilance výměníku pomocí chladného nočního vzduchu). Jelikož průtok vzduchu přes výměník je vyvoláván nuceně, nabízí se možnost dokonalejšího řízení procesu nabíjení a vybíjení. Výměník může navíc být vhodně integrován do stavebních prvků (např. stěna, stropní panel [1], podlaha) a nemusí tedy nutně znamenat navýšení nákladů stavby.

Nevýhodou je, že výkon chlazení je závislý na teplotě venkovního vzduchu během předešlé noci. Prožitá zkušenost posledních let (např. období veder v roce 2003 a 2006) ukazuje, že noční teploty v těchto obdobích nemusejí klesat pod 20 °C, zejména v městské zástavbě. Alternativní techniky chlazení založené na využití nočních teplot proto v těchto extrémních obdobích nelze přeceňovat. Na provoz zařízení je navíc potřeba drahá elektrická energie, která je v současnosti přeměňovaná zejména z neobnovitelných zdrojů energie s negativními důsledky pro životní prostředí. Proto bude velmi důležitá optimalizace vztahu „výkon vs. spotřeba“. Vlastní technický návrh zařízení je multikriteriální a netriviální úloha.



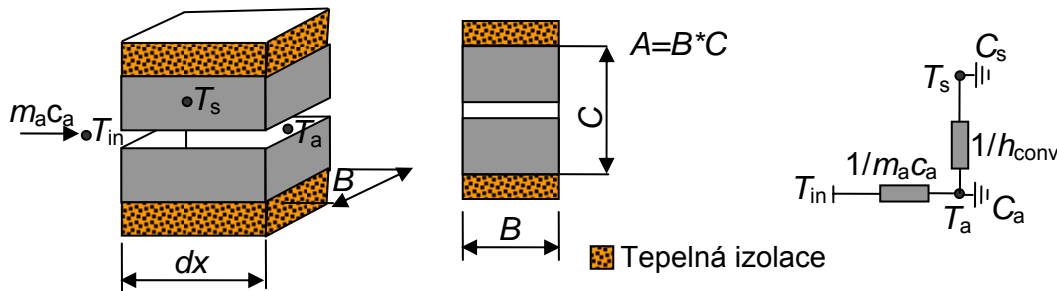
Obrázek 1: Cirkulační režim výměníku vzduch/hmota – schématický nákres

Model výměníku vzduch/hmota

V literatuře lze nalézt řadu modelů pro šterkové zásobníky tepla, tzv. „packed beds“. Cílem je představit postup, jak je v Simulinku možné implementovat jednoduchý model popsany systémem obyčejných diferenciálních rovnic.

Základní popis:

Modelovaný systém je výměník tepla vzduch/hmota celkové délky L s vnější adiabatickou hranicí (obrázek 2). Část základního kvádru s průřezovou plochou A o objemu Adx je vyplněna akumulací hmotou o objemu V_s a teplosměnnou plochou A_s .



Obrázek 2: Schéma výměníku vzduch hmota a elektrická analogie reprezentující jeho zjednodušený model

Předpoklady:

- Hmota v segmentu je nahrazena pouze jedním teplotním uzlem T_s s tepelnou kapacitou C_s . Toto zjednodušení je možné za předpokladu, že teplotní gradient mezi povrchem hmoty a vnitřkem hmoty je zanedbatelný.
- Vedení tepla ve směru podélné osy je zanedbatelné.
- Hmotnostní průtok přes výměník m_a [kg/s] je rovnoměrně rozložený v celé průřezové ploše a vede k rychlosti proudění v_a [m/s] ve výměníku a rychlosti v_{a0} v kanále o průřezové ploše A :

$$v_a = \frac{m_a}{\eta A \rho_a} \quad (1)$$

$$v_{a0} = \frac{m_a}{A \rho_a} \quad (2)$$

kde:

- η je poměr plochy vzduchu k celkové průřezové ploše [-]
- A celková průřezová plocha [m²]
- ρ_a objemová hmotnost vzduchu [kg/m³]

Řídící rovnice:

- tepelná bilance v uzlu T_a :

$$C_a \frac{dT_a}{dt} = m_a c_a (T_{in} - T_a) - A_s h_{conv} (T_a - T_s) \quad [W] \quad (3)$$

- tepelná bilance v uzlu T_s :

$$C_s \frac{dT_s}{dt} = A_s h_{conv} (T_a - T_s) \quad [W] \quad (4)$$

kde:

T_a je	teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$]
C_a	tepelná kapacita uzlu - vzduch [J/K]
T_s	teplota hmoty [$^{\circ}\text{C}$]
C_s	tepelná kapacita uzlu - hmota [J/K]
T_{in}	teplota vzduchu na vstupu [$^{\circ}\text{C}$]
h_{conv}	součinitel přestupu tepla mezi vzduchem a hmotou [W/($\text{m}^2 \cdot \text{K}$)]
t	čas [s]

Kapacity C_a a C_s jsou definovány jako:

$$C_a = \rho_a c_a \eta A dx \quad [\text{J/K}] \quad (5)$$

$$C_s = \rho_s c_s (1 - \eta) A dx \quad [\text{J/K}] \quad (6)$$

kde:

c_a je	měrná tepelná kapacita vzduchu [J/(kg.K)]
ρ_s	objemová hmotnost akumulčního materiálu [kg/m^3]
c_s	měrná tepelná kapacita akumulčního materiálu [J/(kg.K)]

Povšimněme si ještě následujících skutečností:

- Model umožňuje zabývat se obecným uspořádáním akumulční hmoty výměníku.
- Díličí problémy jako výpočet součinitele přestupu tepla konvekcí h_{conv} , výpočet teplosměnné plochy A_s , např. u boxů vyplněných šterkem nebo kulovými částicemi, zde nejsou popisovány.
- Tepelná vodivost akumulčního materiálu λ_s není vstupním parametrem do modelu, což je důsledkem modelového předpokladu nulového teplotního gradientu mezi povrchem a vnitřkem hmoty. Platnost tohoto předpokladu lze ověřit splněním podmínky, viz [2]:

$$Bi = \frac{L_c}{d} \leq 0.2 \quad [-] \quad (7)$$

kde:

Bi je	Biotovo číslo [-]
L_c	charakteristická délka [m], která je pro modelovaný případ aproximována jako:

$$L_c = 2 \frac{V_s}{A_s} \quad [\text{m}] \quad (8)$$

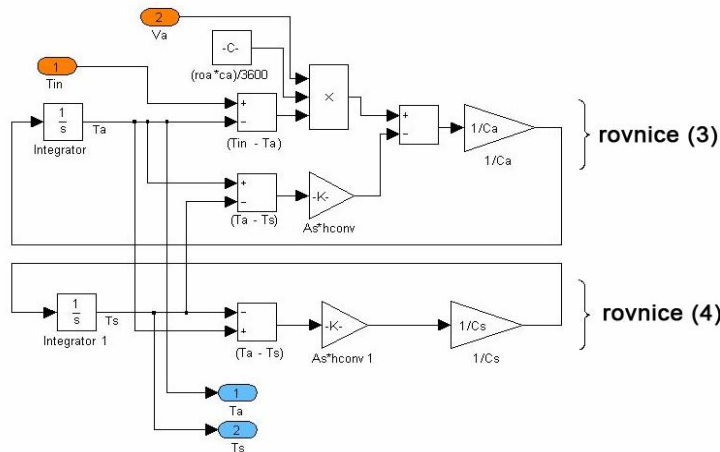
d je poměr:

$$d = \frac{\lambda_s}{h_{conv}} \quad [\text{m}] \quad (9)$$

Podmínka (7) patrně nebude vždy dokonale splněna, s důsledky pro přesnost modelu.

Reprezentace modelu v Simulinku:

Grafická reprezentace řídicích rovnic v Simulinku je zobrazena na obrázku 3.



Obrázek 3: Reprezentace řídicích rovnic v Simulinku, subsystém popisující jeden segment výměníku dle obr. 2

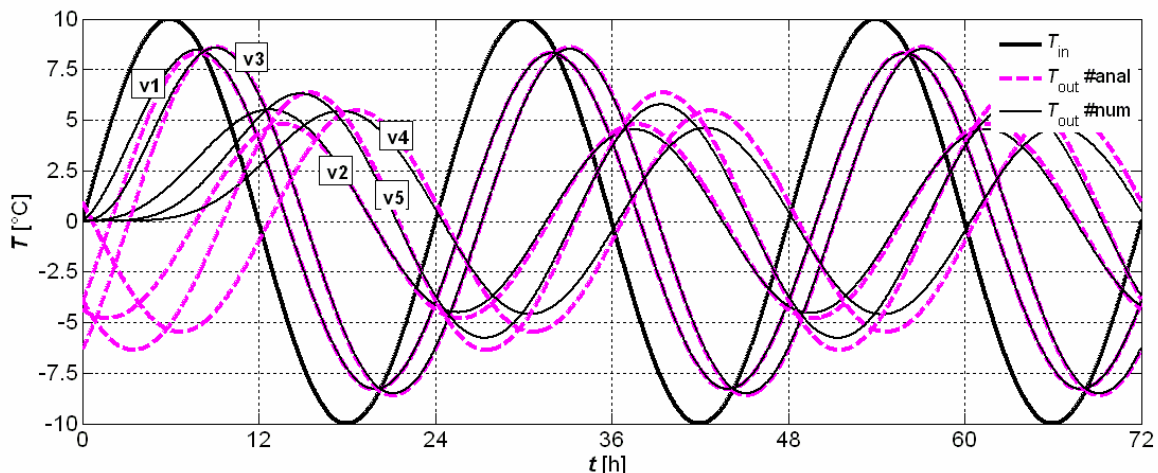
Analytická validace:

Validace je důležitou součástí tvorby jakéhokoliv modelu, protože umožní odstranit základní chyby a otestovat vyvinutý výpočetní nástroj. Analytické řešení publikované v [3] bylo využito k validaci vytvořeného zjednodušeného modelu. Modelovány byly následující případy, viz tabulka 1.

Tabulka 1: Konfigurace výměníků použité pro validaci modelu

označení	L [m]	B [m]	C [m]	η [-]	A_s [m ²]	V_a [m ³ /h]	v_{a0} [m/s]	v_a [m/s]	h_{conv} [W/m ² .K]
v1	3	0.25	0.25	0.44	5.25	100	0.44	1.00	10
v2	12	0.25	0.25	0.44	21.0	100	0.44	1.00	10
v3	3	0.25	0.25	0.16	15.75	100	0.44	2.78	10
v4	12	0.25	0.25	0.16	63.0	100	0.44	2.78	10
v5	3	0.25	0.25	0.16	15.75	33.3	0.15	0.93	10

vlastnosti materiálu: $\lambda_s = 1,5 \text{ W/(m.K)}$, $\rho_s = 2500 \text{ kg/m}^3$, $c_s = 1000 \text{ J/(kg.K)}$
výměník délky L byl rozdělen na 30 podélných segmentů



Obrázek 4: Porovnání numerického řešení s výsledky z analytického modelu (#anal – výsledky z analytického řešení, #num – výsledky numerického modelu)

Shoda výsledků numerického výpočtu s výsledky analytického modelu je poměrně dobrá, i když zdaleka ne perfektní (obrázek 4). Chování skutečných výměníků bude navíc zatíženo vlivy, které nebyly ve formulaci numerického ale ani analytického

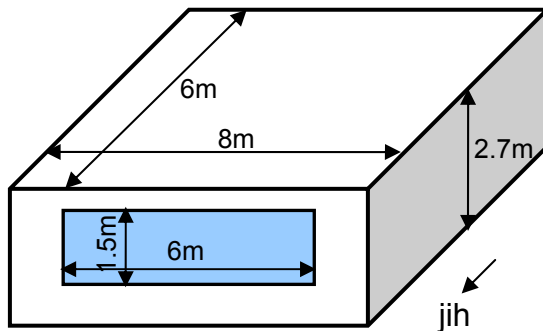
modelu zohledněny (např. vedení tepla v podélném směru, nedokonalost adiabatické hranice a zejména nerovnoměrnost průtoku v průřezu).

Případová studie – využití řízené akumulace tepla pro chlazení budov

Cílem případové studie je implementovat termický model cirkulace vzduchu přes výměník vzduch-hmota do modelu budovy vytvořeném v HAMbase. Originální model HAMbase upravili jeho autoři do podoby tzv. S-funkce [4], s kterou dokáže Simulink pracovat.

Popis budovy:

Geometrie simulované budovy (obrázek 5) je převzata z [5], uvažován však je odlišný podíl prosklení, více odpovídající běžným hodnotám (přibližně 40 %). Obvodové stěny a střechu tvoří 2 cm sádkokarton, 25 cm tepelná izolace z minerálních vláken. Podlaha je tvořena 2,5 cm nášlapné vrstvy z dřevěných fošen, 25 cm tepelné izolace z minerálních vláken, 20 cm betonové desky a 100 cm vrstvy zeminy, na jejíž spodní straně je umístěna izotermická okrajová podmínka 10 °C. Uvnitř zóny nejsou žádné další konstrukce. Okno má součinitel prostupu tepla 1.0 W/(m².K) a energetickou propustnost 0.5 v nezastíněném stavu a 0.05 v zastíněném stavu.



Obrázek 5: Simulovaná budova

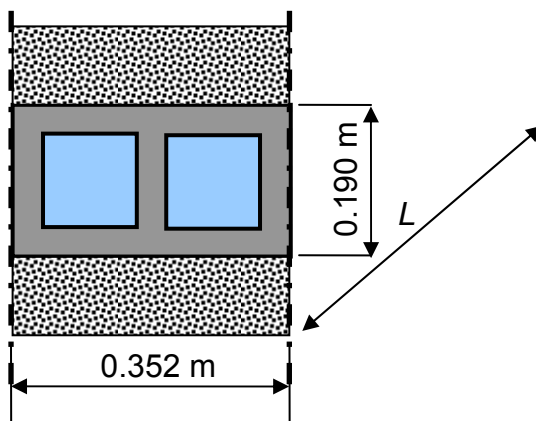
Popis modelu:

Obvodové konstrukce jsou nahrazeny plochami. Objem vzduchu je vypočten z vnějších rozměrů, aniž by bylo uvažováno s tloušťkami konstrukcí (8 x 6 x 2.7 m). V modelu je předpokládáno 150 W citelných vnitřních zisků sdílených ze 60 % radiací, ze 40 % konvekcí. U varianty s řízenou akumulací tepla je sdílení tepla z tohoto systému uvažováno ze 100 % konvekcí. Pohltivost vnějších povrchů je uvažována 0.6, emisivita pro dlouhovlnnou radiaci je uvažována 0.9. U vnitřních povrchů je uvažováno s průměrnými přestupovými součiniteli 5 W/(m².K) pro radiaci a 2.7 W/(m².K) pro konvekci. Klimatická data byla využita data z roku 2006, měřená na stanici Praha Karlov. Simulováno bylo období dvacetidvou dnů; začátek simulovaného období byl 1.7.2006.

Výpočtové scénáře:

- „var0“ – základní varianta, bez stínění oken, intenzita větrání 0.3 h⁻¹ konstantní během celého dne;
- „var1“ – jako var0 s uvažováním stínění oken, které se aktivuje při intenzitě solárního záření 100 W/m² dopadajícího na povrch okna a zároveň při teplotě vnitřního vzduchu vyšší než 20 °C;

- „var2“ – jako var1 s uvažováním nočního větrání ($2,5 \text{ h}^{-1}$), které může nastat mezi 22:00 a 7:00, toto větrání nenastane, pokud je teplota vnitřního vzduchu nižší než $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (v tomto případě zůstává $0,3 \text{ h}^{-1}$);
- „var3“ – jako var2, sádkarton obvodových konstrukcí a střechy budovy je nahrazen 15 cm monolitického betonu.
- „varPB“ – jako var2, s cirkulačním chlazením, výměník vzduch/hmota je vytvořen z běžné betonové tvárnice (viz obrázek 6). Je předpokládáno paralelní zapojení čtyř těchto částí, což představuje dvojnásobnou výměnu vzduchu v simulované zóně ($4 \times 65 \text{ m}^3/\text{h}$). Vlastnosti výměníku viz tabulka 2 a tabulka 3. Rozměry obvodových konstrukcí budovy nebyly nijak upravovány oproti předchozím variantám, výměník je uvažován jako dodatečný prvek, aniž by nahradil část obvodových konstrukcí. Regulace aktivuje cirkulaci vzduchu do zóny mezi 07:00 – 22:00. Noční vybíjení výměníku nastává tedy pouze po dobu 8 hodin, zato s dvojnásobným průtokem ($4 \times 130 \text{ m}^3/\text{h}$).



Obrázek 6: Segment výměníku vzduch hmota vytvořeného z betonové tvárnice

Tabulka 2: Základní informace o segmentu výměníku vzduch/hmota

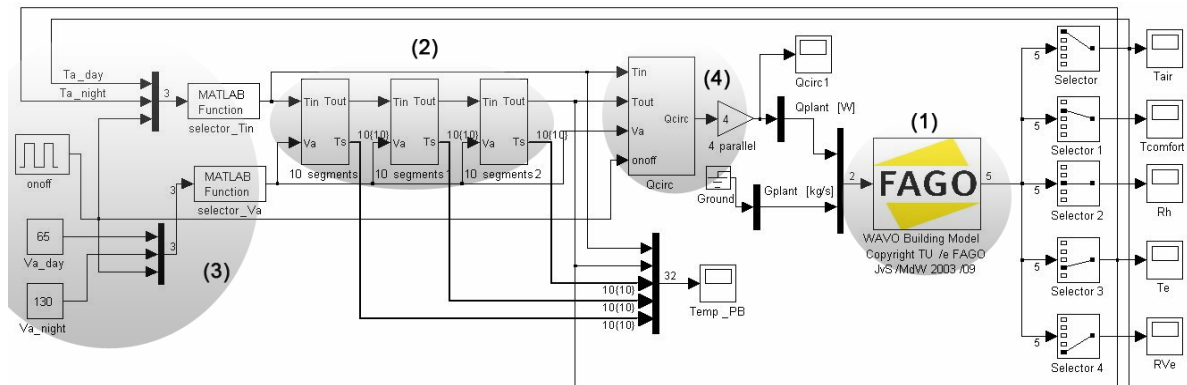
L [m]	B [m]	C [m]	η [-]	A_s [m^2]	hmotnost [kg]
5.7	0.35	0.19	0.54	6.12	395
vlastnosti materiálu: $\lambda_s = 1,33 \text{ W}/(\text{m}.\text{K})$, $\rho_s = 2250 \text{ kg}/\text{m}^3$, $c_s = 1020 \text{ J}/(\text{kg}.\text{K})$					

Tabulka 3: Průtok vzduchu přes segment výměník vzduch/hmota

V_a [m^3/h]	v_{a0} [m/s]	v_a [m/s]	V_a/A [$\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$]	$V_a/(\eta A)$ [$\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$]	V_a/A_s [$\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$]	h_{conv}^* [$\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$]
65	0.27	0.50	977	1805	319	~3
130	0.54	1.00	1955	3610	637	~6
*spočteno z obvyklého vztahu $Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.3}$ [7]						

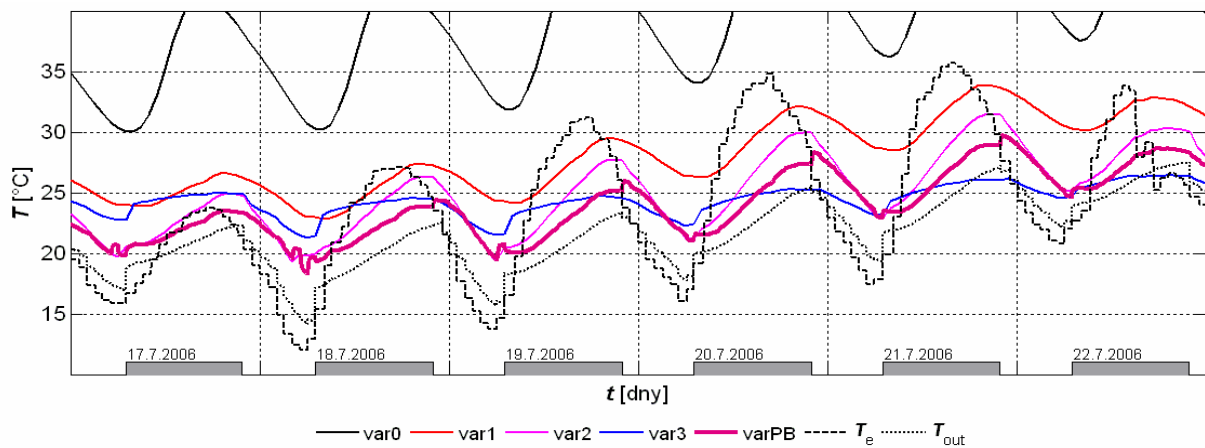
Reprezentace modelu v Simulinku

Vysvětlení oblastí na obrázku 7: oblast 1 je simulace zóny (HAMbase), oblast 2 představuje simulaci výměníku vzduch/hmota (vytvořený model), oblast 3 představuje jednoduchou regulaci výměníku vzduch/hmota (viz popis varPB), oblast 4 je výpočet výkonu chlazení.

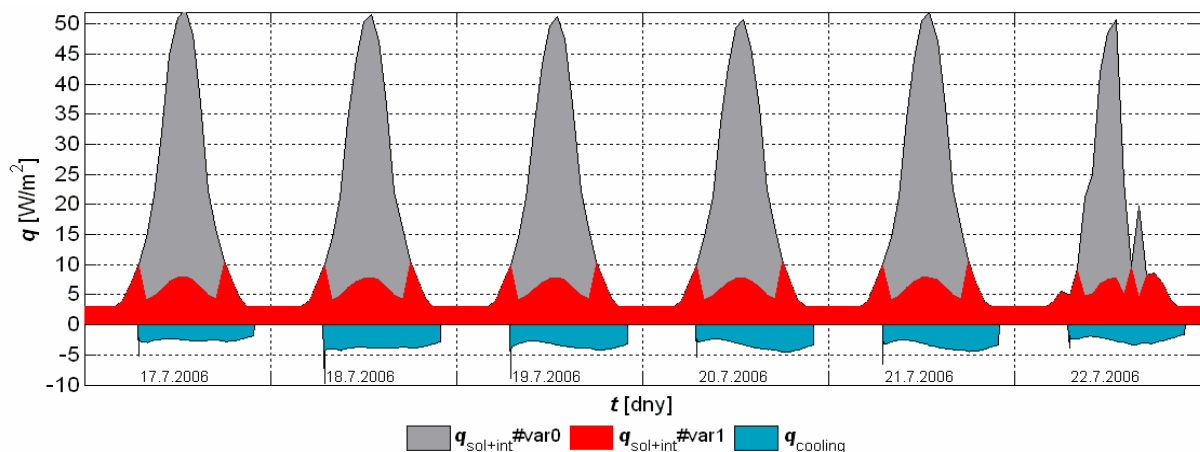


Obrázek 7: Schéma simulovaného systému v Simulinku

Výsledky simulací:



Obrázek 8: Vypočtené teploty vzduchu v budově pro jednotlivé scénáře (var0 – varPB), T_e je teplota vnějšího vzduchu, T_{out} je teplota vzduchu na výstupu z výměníku vzduch/hmota



Obrázek 9: Vypočtené hodnoty tepelné zátěže od solárního záření a vnitřních zisků $q_{sol+int}$, výkon chlazení výměníku vzduch/hmota $q_{cooling}$. Hodnoty jsou vztaheny na $1m^2$ podlahové plochy budovy ($8 m \times 6 m = 48 m^2$).

Závěr

Přínos využití řízené akumulace tepla by mohl být ve snižování hodnoty špičkové tepelné zátěže budov a tím zmenšování velikosti klimatizace, zejména u lehkých

staveb s vyššími vnitřními zisky. Nadbytečná tepelná zátěž by samozřejmě měla být nejprve důsledně redukována stavebním řešením. Logickým navazujícím krokem by měla být parametrická studie tepelného chování výměníků vzduch/hmota (maximalizace energetické efektivity). Existuje řada možností jak zvětšovat přestupovou plochu a součinitel přestupu tepla, ale jako u každého výměníku to s sebou nese vyšší tlakové ztráty. Kde leží optimum? Teoretické studium by mohlo vést k návrhu prototypů a jejich laboratornímu ověření.

Využití materiálu se skupenskou změnou by mohlo znamenat podstatné snížení potřebného množství akumulární hmoty. Model výměníku vzduch/hmota proto bude v budoucnu rozšířen i o případ, kdy je akumulární hmota nahrazena materiálem se skupenskou změnou. V [6] byl například zkoumán výměník vytvořený z malých kapslí vyplněných materiálem s fázovou změnou nasypaných do válcového zásobníku, přes který byl nasáván vzduch. Vyvinutý numerický model byl úspěšně experimentálně validován. Navazující případová studie nízkoenergetického domu chlazeného pomocí výměníku vzduch/materiál se skupenskou změnou prokázala možnost použití této techniky. Potřebné množství materiálu bylo 6 kg/m^2 podlahové plochy (přibližně šestina hmoty použité v případové studii), pro dům s 200 m^2 se tedy jedná o přibližně 1200 kg materiálu.

Literatura

- [1] Barton, P., Beggs, C., B., Sleight, P., A.: A theoretical study of thermal performance of the TermoDeck hollow core slab system, Applied Thermal Engineering 22, 2002.
- [2] Hagentoft, C., E.: Introduction to Building Physics, Studentlitteratur, 2001.
- [3] Hollmuller, P., Lachal, B., Zraggen, J. M.: A new heat exchange and storage technique for ventilation: controlled thermal phase-shifting, HeatSET 2007, Chambéry, France, 2007.
- [4] Writing S-functions, The MathWorks, Inc.
- [5] Ashrae: Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs, standard 140-2001, 2001.
- [6] Arkar, C., Medved, S.: Free cooling of a building using PCM heat storage integrated into the ventilation system, Solar Energy 81, 2007.
- [7] Ashrae: Handbook of Fundamentals, 2001.