

Ing. Simona NESVADBOVÁ
 ČVUT v Praze, Fakulta strojní,
 Ústav techniky prostředí

Dynamika vytápěcích systémů

Dynamics of heating systems

Recenzent
 doc. Ing. Jiří Bašta, Ph.D.

V článku jsou uvedeny obecné vlastnosti, jež ovlivňují dynamiku vytápěcích systémů. Jsou zde popsány používané metody řešení a hodnocení tepelné dynamiky ve světě.

Klíčová slova: vytápění, tepelné čerpadlo, tepelná setrvačnost

The article presents common characteristics, that affect dynamics of heating systems. There are described used methods of analysis and evaluation of heat dynamics in the world.

Key words: heating, heat pump, heat inertia

Kritériem pro posouzení dynamiky vytápěcích systémů je tepelná setrvačnost otopné plochy, vyjádřená časovou konstantou [2]. Tepelná setrvačnost je jednou z provozních charakteristik otopné plochy. Tepelnou setrvačnost ovlivňuje především obsah vody, ale také materiál a konstrukce. Nejvíce setrvačné jsou podlahové otopné plochy. Zde působí vliv tloušťky betonové vrstvy nad otopnou trubkou, její tepelná vodivost a způsob provedení. Vyšší tepelnou setrvačnost mají podlahové otopné plochy zhotovené mokrym způsobem. Při suchém způsobu provedení bude tepelná setrvačnost menší. Desková otopná tělesa mají oproti článkovým otopným tělesům menší tepelnou setrvačnost, neboť mají i menší vodní obsah. V tomto případě záleží též na materiálu otopného tělesa a způsobu jeho výroby: největší tepelnou setrvačnost mají litinová otopná tělesa, za nimi následují ocelová otopná tělesa a nejmenší tepelnou setrvačnost se vyznačují malobjemová otopná tělesa ze slitin hliníku. Dobu náběhu lze spolehlivě zjistit pouze měřením.

S tepelnou setrvačností otopné plochy souvisí přenos tepla do vnitřních vytápěných prostor, a tím také rychlost reakce na regulační zásah, pružnost při zátoku a chladnutí a doba potřebná k dosažení požadované tepelné pohody v prostoru. Dynamiku otopné soustavy ve spojení s tepelným čerpadlem ovlivňuje především typ otopné soustavy a její tepelná setrvačnost, v menší míře typ zdroje tepla. Dynamika vytápěného objektu je ovlivněna jeho akumulací schopností. Při vytápění objektu, jehož stěny lze klasifikovat jako těžké, se bude teplota ve vytápěném prostoru měnit pozvolna. Naopak u objektu s lehkou obvodovou konstrukcí lze pozorovat rychlé změny teplot.

U systému „tepelné čerpadlo – otopná soustava“ je nutno zvážit vhodnost použití vyrovnávacího akumulátoru. Závisejí to mimo jiné i na volbě druhotného zdroje tepla a jeho provozu, ale hlavně a především na tepelné setrvačnosti zvolené otopné soustavy. Vyrovnávací akumulátor se doporučuje použít u systémů s deskovými otopnými tělesy, téměř zbytečný je při podlahovém vytápění. Vyrovnávací akumulátor vytápí objekt po dobu odstavení zdroje tepla na akumulovaným teplem a jeho velikost je ovlivněna tepelnými ztrátami a akumulací schopností vytápěné budovy.

Dynamika vytápěcích soustav byla řešena především v zahraničí. Ve Finsku [3] byl zvážen vliv součinitele přestupu tepla konvekcí na vnitřní straně

stěny a součinitele přestupu tepla sáláním mezi dvěma vnitřními povrchy na dynamiku teploty vzduchu, tepelného toku stěnou a povrchové teploty, které byly měřeny v testovací komoře sestavené pro tento účel. V [3] byl také využit program tepelné analýzy budov TASE. V Dánsku [4] byla pro popis dynamiky použita metoda odhadu časově kontinuálních modelů, kde byl pro uvažovanou budovu shledán postačujícím model obsahující dvě časové konstanty. Následně byla v Dánsku [5] provedena simulace a předpověď (odhad průběhu teploty vzduchu v místnosti) použitého modelu. Použitím této metody byla v Dánsku dynamika budovy modelována s použitím stochastických diferenciálních rovnic. Každá testovací místnost byla rozdělena do dvou tepelných zón a mohl být tak popsán model jak krátkodobé, tak dlouhodobé změny. Změny teplot se zde popisují jako soustava diferenciálních rovnic, která využívá přenos tepla konvekcí (prouděním), vedením a sáláním v jednotlivých zónách.

Účinek součinitele přestupu tepla konvekcí na vnitřní straně stěny a součinitele přestupu tepla sáláním mezi dvěma vnitřními povrchy na tepelnou dynamiku (Finsko [3])

Práce [3] studuje účinek součinitele přestupu tepla konvekcí na vnitřní straně stěny a součinitele přestupu tepla sáláním mezi dvěma vnitřními povrchy na tepelnou dynamiku kancelářské budovy. Řešení metody zahrnuje sálání mezi vnitřními povrchy včetně tepelné rovnováhy pro každý vnitřní povrch. Program TASE obsahuje model pro vytápěcí systém s otopnými tělesy.

Naměřené hodnoty povrchových teplot vnitřního vzduchu a toku tepla stěnou byly porovnány s vypočtenými hodnotami. Kolísání součinitele přestupu tepla konvekcí na vnitřní straně je přibližně v rozmezí 0,5 až 5,0 W/m².K. Velikost této hodnoty záleží na typu systému a tepelně technické situaci v prostoru.

Schopnost programu TASE počítat stacionární stav a nestacionární podmínky byla studována ve dvou místnostech zkušební komory postavených v tepelné laboratoři. Zkušební komora byla umístěna uvnitř budovy, kde nebylo žádné sluneční záření. Bylo použito soustavy s otopnými tělesy pod okny. Tepelná dynamika komory byla studována při vytápění a při chladnutí. Byla vytápěna pouze jedna ze

dvou místností a dveře mezi místnostmi byly vzduchotěsně uzavřeny. V druhé místnosti byl pouze malý tepelný zisk (méně než 35 W) od elektrického transformátoru.

Během měření nebylo použito nucené větrání. Intenzita výměny vzduchu během měření se pohybovala v rozmezí od 0 do 0,7 h⁻¹. Velikost hodnoty závisela na tom, zda se vytápělo nebo zda byla místnost chlazená a na teplotním rozdílu mezi vnitřním a vnějším vzduchem. Odsávací ventilátor byl umístěn na stěně blízko stropu. Stěny, strop a podlaha byly z lehké struktury (dřevotřískas + ply-urethanová izolace + ochranné sklo). Okna měla trojitě zasklení.

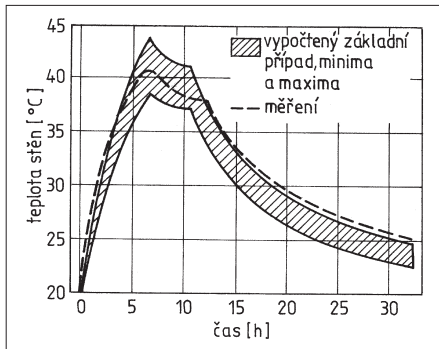
Hodnoty tepelného toku z vnitřního povrchu stěn, stropu, podlahy a oken byly měřeny za ustáleného stavu a zapisovány kontinuálně. Bylo naměřeno přibližně 50 teplot vnitřních povrchů a vnitřního a venkovního vzduchu. Všechna data byla sbírána s časovým krokem jedna min. a byly také zapisovány průměrné hodnoty po každých 10 min. Teplota vzduchu je uváděna jako průměrná hodnota sedmi měřících bodů ve středu místnosti mezi výškami 0,1 a 2,4 m.

Nejprve byla jedna ze dvou místností zkušební komory elektrickým otopným tělesem intenzivně vytápěná (po 6,5 h). Do místnosti, ve které se měřilo byl přiváděn výkon 770 W. Během této fáze byla změna vnitřní teploty 3 K.h⁻¹. Přiváděný příkon z elektrického transformátoru do druhé místnosti byl v této fázi 35 W. V druhé fázi byl přiváděný výkon za 4 h snížen na 400 W a v druhé místnosti na 25 W. V třetí fázi bylo vypnuto vytápění a místnost se nechala 20 h chladnout. Rychlost chladnutí byla přibližně 0,6 K.h⁻¹.

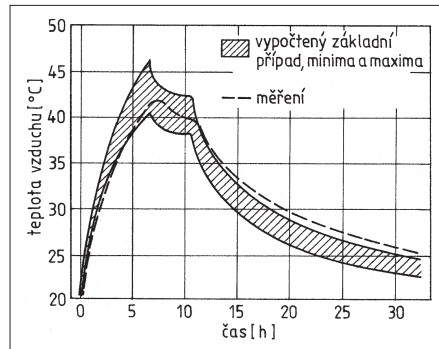
Obr. 1 a 2 ukazují, jak rychle se mění teploty a hodnoty měrného tepelného toku vypočtené součinitelem přestupu tepla (max. a min. hodnoty) oproti měřeným hodnotám. Zvláště během fáze chladnutí, ale i vytápění se mění vypočtené hodnoty rychleji než naměřené. Pro podlahu a okno jsou výsledky podobné jako pro stěnu a strop.

Přibližné časově kontinuální modely pro tepelnou dynamiku budovy (Dánsko [4])

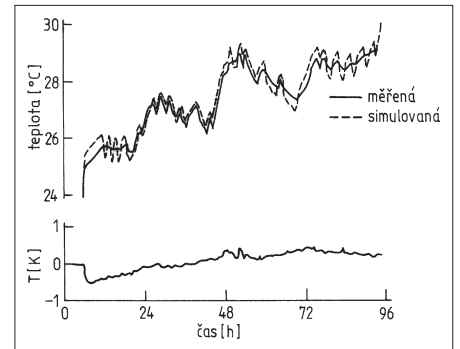
Práce [4] popisuje metodu pro odhad časově kontinuálních modelů pro tepelnou dynamiku založenou na časově diskrétních (nespojitéch) výkono-



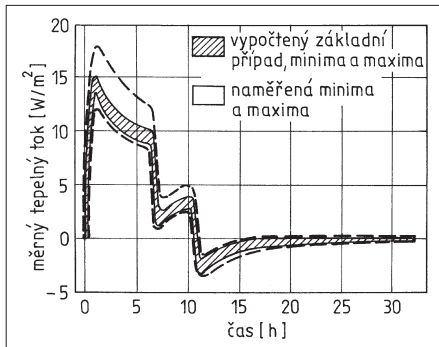
Obr. 1a – Naměřené a vypočtené povrchové teploty stěn [3]



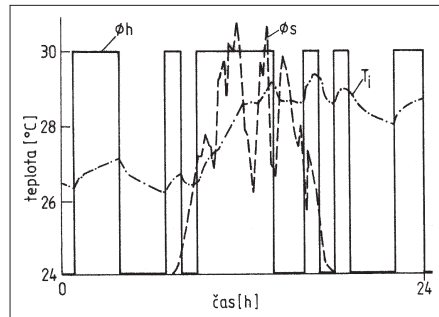
Obr. 2 Vliv součinitelů přestupu tepla konvekcí (max. a min. hodnoty) na určení teploty vzduchu v místnosti [3]



Obr. 4 Nasimulovaná a naměřená teplota vzduchu v místnosti v období 10. až 14. října 1983 (výchozí hodnota je 24,62 °C nahoře a jejich rozdíl dole [4])



Obr. 1b – Naměřené a vypočtené hodnoty měrného tepelného toku stěnami



Obr. 3 Měření dopadajícího slunečního záření, příkonu elektrických topných těles a teploty vzduchu v místnosti během jednoho dne [4]

vých údajích budovy. Parametry v tomto modelu se odhadují podle metody maximální pravděpodobnosti. Modelovací proces je doplněn experimentem. Pro uvažovanou budovu je sledován postačujícím dosti jednoduchý model obsahující dvě časové konstanty.

K odvození celkového modelu pro tepelnou dynamiku budovy se mohou použít dva odlišné postupy. Tradiční postup spočívá ve využití znalostí fyzikálních charakteristik a dobře stanovených dílčích postupů modelů. Náhradní postup spočívá v použití výkonových údajů budovy a statistických metod. Nevýhodou tradičního postupu jsou nesnáze při získání dostatečně věrohodných parametrů.

Hlavním účelem práce [4] bylo prodiskutovat odhad jednoduchého časově-kontinuálního modelu pro experimentální budovu, která jasně popisuje, jak zasahuje nejistota měření a chyba modelu do výsledků modelu. Druhým cílem, který se prezentuje ve [4], bylo určení, zda daný model obsahuje dostatečný popis sledované tepelné dynamiky.

Data z experimentu se získala v laboratorii na Technické univerzitě v Dánsku. Testovací budova je jednopodlažní dům postavený ze dřeva s podkrovím. Podlaha a stěny jsou z lehké sendvičové konstrukce založené na mezonetovém trámu izolovaném 300 mm tlustou minerální vlnou. Přízemí, ve kterém se nachází testovací prostor, je rozděleno do východní a západní místnosti, každé o 60 m² s přepažující zdí izolovanou minerální vlnou o tloušťce 95 mm. Plocha oken tvoří 15 % plochy podlahy, 10 % je orientováno na jih a 5 % na sever. Všechna okna jsou trojitě zasklená. Budova je těsná.

V uvažovaném experimentu se místnost orientovaná na východ změnila na tepelně těžkou přidáním 92 m² betonových kostek o tloušťce 50 mm. Ve zkušebním programu se uvažuje pouze měření východní místnosti. Pro dobavu tepla do obou místností se používají elektrická topná tělesa 3 x 500 W.

Po 10 min. byly měřeny následující proměnné:

- T_i – teplota vzduchu v místnosti (°C),
- T_o – povrchová teplota stěn (°C),
- T_a – venkovní teplota (°C),
- ϕ_h – příkon z elektrických topných těles (W),
- ϕ_s – intenzita sluneční radiace na svislé stěně orientované na jih (W/m²).

Nejzajímavější měření jsou zobrazena na obr. 3, kde teplota vzduchu v místnosti je značně ovlivněna změnami sluneční radiace i příkonem elektrických topných těles. Teplota vzduchu v místnosti poměrně rychle reaguje na změny příkonů ϕ_s , ϕ_h .

To značí, že je zapotřebí nejméně druhý dynamický model pro popsání změn teploty vzduchu v místnosti.

Model se vyhodnocuje třemi různými postupy. Za prvé odhadnuté parametry jsou porovnány s parametry vypočtenými tradičním způsobem z fyzikálních charakteristik budov. Za druhé statistické metody se používají pro ověření modelu a nakonec se zobrazí provedení modelu simulací a předpovědi se využítí.

Lze konstatovat, že hodnoty odhadnutých parametrů se dobře shodují s vypočtenými hodnotami pro

parametry, které lze nejjednodušeji vypočítat ze základních fyzikálních údajů.

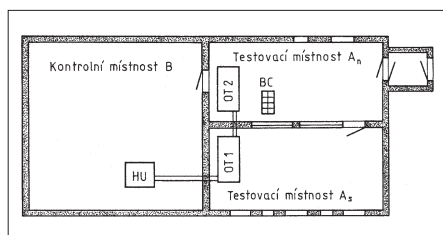
Obr. 4 ukazuje naměřenou a nasimulovanou teplotu vzduchu v místnosti. Je zde pozorovatelná dobrá shoda mezi naměřenou a nasimulovanou teplotou. Model dostatečně dobře popisuje krátkodobý i dlouhodobý výkon systému.

Modelování tepelné dynamiky budovy s použitím stochastických diferenciálních rovnic (Dánsko[5])

Článek [5] popisuje časově kontinuální modelování tepelné dynamiky budovy. Použití modelů pro tepelnou dynamiku v budově je citlivá a proveditelná metoda ke snížení spotřeby energie a zlepšení tepelné pohody.

„Modelovací metoda šedé skříně“ (grey box modeling method) je použita tak, aby se odvodil celkový model pro tepelnou dynamiku budovy s testovací místností. Navržený model je formulován jako systém stochastických diferenciálních rovnic a metody maximální pravděpodobnosti a je použit pro odhad parametrů v časově kontinuálním modelu založeném na časově diskretních výkonových datech budovy. Struktura modelu šedé skříně může být určena ze znalosti fyzikální charakteristik budovy (tradiční postup) a z informací o výkonových datech budovy (technické údaje výkonu).

Pozornost je soustředěna na modelování dynamiky vnitřní teploty vzduchu v obytné budově v závislosti na vstupech jako je např. sluneční záření či teplo z topných těles. Je uvažována nízkoenergetická budova. Model je formulován v kontinuálním čase přes stochastické diferenciální rovnice (rovnice, které obsahují matice charakterizující dynamické chování systému, matice popisující vstupní signály ovlivňující změny teploty a přídatný hlukový člen). Statistické metody jsou použity k určení, odhadnutí a ohodnocení navrženého modelu. Modelovací postup se může skládat ze tří etap: určení, odhadnutí a ohodnocení. Cyklus pokračuje až do té doby, kdy je nalezena dostatečující parametrizace modelu. K popisu teplotních změn se sestavuje soustava diferenciálních rovnic využívající přenos tepla konvekcí (prouděním), vedením a sáláním v jednotlivých zónách.



Obr. 5 Schéma testovací budovy a jejího interiéru [5]

Práce [5] popisuje časově kontinuální modelování tepelné dynamiky neobydlené budovy viz obr. 5. Každá ze dvou testovacích místností A_s a A_n je rozdělena do dvou tepelných zón tak, aby se popsala jak krátkodobá, tak dlouhodobá změna. Testovací místnost A_s má plochu oken $3,6 \text{ m}^2$ orientovanou na jih, zatímco testovací místnost A_n má plochu oken $1,9 \text{ m}^2$ orientovanou na sever. Místnost B má plochu 60 m^2 a slouží jako řídicí zóna. Všechna okna v řídicí místnosti jsou chráněna proti sluneční radiaci. Kromě toho při modelování přenosů tepla je nutno dát pozor na modelování vstupů tepla z otopných těles a slunečního záření.

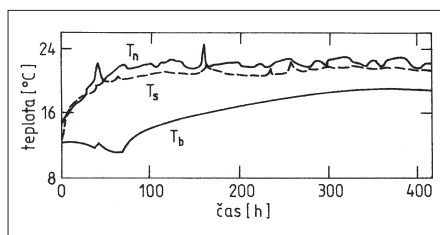
Jde o nízkoenergetickou stavbu, kterou lze charakterizovat jmenovitou tepelnou ztrátou cca $2,5 \text{ kW}$ při $t_e = -12 \text{ }^\circ\text{C}$ a $t_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Strop a venkovní stěny testovací budovy jsou z lehké stavební konstrukce (stěny jsou izolovány minerální vlnou) a podlahy v místnostech mají těžkou stavební konstrukci. Pro dodávku tepla je použit systém centrálního teplovodního vytápění. Skládá se z vytápěcí jednotky HU umístěné v místnosti B a otopného tělesa (OT) v každé testovací místnosti o stejném výkonu 395 W , který je řízen termostatickou hlavici. Dalším zdrojem tepla v místnosti A_n je jednotka označená BC.

V modelovacím procesu jsou použita měření z experimentu. Byly měřeny následující proměnné:

- T_i ($^\circ\text{C}$) – teplota vzduchu v místnosti
- T_u ($^\circ\text{C}$) – venkovní teplota vzduchu,
- I (W/m^2) – intenzita slunečního záření,
- T_s ($^\circ\text{C}$) – vstupní teplota teplotnosné látky do otopného tělesa,
- T_r ($^\circ\text{C}$) – výstupní teplota teplotnosné látky z otopného tělesa,
- q (l/h) – průtok vody otopným tělesem.

Teploty vzduchu byly měřeny v několika bodech v každé ze tří místností. Venkovní teplota a sluneční radiace byly měřeny na jižní a severní straně testovací budovy. Vstupní a výstupní teploty teplotnosné látky a průtok otopným tělesem byly měřeny v každé testovací místnosti.

Jak je patrné z obr. 6 v řídicí místnosti B se teplota T_b zvyšuje pomalu. To je ovlivněno tepelnou ztrátou vytápěcí jednotky do okolí a prostupem tepla ze sousedních testovacích vytápěných místností. Teploty vzduchu v obou testovacích místnostech dosahují podobných hodnot. V testovací místnosti orientované na jih se teplota vzduchu zvyšuje rychle při intenzivním působení slunečního záření. Při vysoké intenzitě slunečního záření se v této místnosti

Obr. 6a – Naměřené teploty v testovacích místnostech A_s a A_n a kontrolní místnosti B [5]

snížíže zásahem termostatických hlavic průtok otopným tělesem. Na severní straně je měřena pouze difúzní radiace.

Na každou testovací místnost se pohlíží jako na dvě rozdílné tepelné zóny – vzduch a stěny. Rovnice pro každou zónu popisují sdílení tepla vedením, prouděním a sáláním. Uvažuje se, že největší vliv na teplotu vzduchu v místnosti mají tepelné zisky od oslunění, příkon BC-jednotky a otopných těles, prostup tepla stěnami a přestup tepla u podlahy v každé místnosti.

Vezme-li se v úvahu aproximace modelu lze tepelnou dynamiku a přenos tepla vyjádřit jako soustavu obyčejných diferenciálních rovnic.

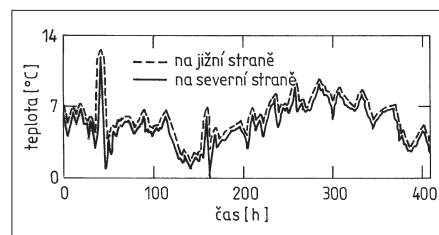
Simulace, použitím odhadnutých parametrů (přes pravděpodobnostní metody ML) pro příslušné rovnice, dokázala velmi vysokou přesnost modelu. Statistickými a fyzikálními testy systému se dokázalo, že model udává dobrý popis tepelné dynamiky uvažované budovy.

Závěr

Program tepelné analýzy TASE, metoda časově kontinuálních modelů, stejně tak, jako metoda modelování s použitím stochastických diferenciálních rovnic založená na modelovacím postupu šedé skříňové slouží k zjištění a zlepšení dosažení požadované tepelné pohody i s ohledem na množství spotřeby energie pro vytápění. Výše uvedené metody byly ověřeny experimenty, které prokázaly, že výsledky získané simulacemi se velmi dobře shodují s naměřenými hodnotami.

Bylo prokázáno, že dynamika teploty vzduchu v místnosti je ovlivněna mnoha faktory. Největší vliv mají samozřejmě změny klimatických podmínek, ale i stavební konstrukce vytápěného objektu. Ve všech třech případech byly testovány komory, které měly lehkou obvodovou konstrukci.

V práci [3] bylo dokázáno, že naměřené hodnoty se shodovaly s výsledky povrchových teplot stěn stropu i podlahy, teplot vzduchu v místnosti i měrných tepelných toků stěnami vypočtenými součiniteli přestupu tepla. Největší změny teplot a měrných tepelných toků byly patrné během intenzivního vytápění. Nejpomalejší změny byly zaznamenány v průběhu snížení přiváděného výkonu. Rychlejší změny byly pozorovatelné během chlazení. Účinky součinitelů přestupu tepla konvekcí, stejně tak jako sáláním, na hodnoty povrchových teplot a měrného tepelného toku stěnami jsou



Obr. 6b – Naměřené venkovní teploty

malé, avšak mají větší vliv na hodnotu teploty vzduchu.

Teplota vzduchu v objektu (práce [4] a [5]) se velmi rychle měnila v závislosti na změnách venkovního klimatu, ale byla ovlivněna i prostupem tepla z obklopujících místností. Bylo zde také patrné působení tepelných zisků od oslunění okny v místnostech vystavených přímé sluneční radiaci. Použité modely využívají sdílení tepla, fyzikální charakteristiky a výkonové údaje budovy. S využitím statistických metod a metod maximální pravděpodobnosti mohou modely udávat dostatečně přesné krátkodobé i dlouhodobé změny teploty vzduchu ve vytápěném objektu. To může pomoci k co nejhodnotnějšímu návrhu vytápěcího systému a jeho energetické efektivnosti.

V současné době probíhá příprava experimentu v testovací komoře v areálu laboratoří Ústavu techniky prostředí. Bude zkoumáno dynamické chování vytápěcího systému s otopným tělesem. Místnost nebude ovlivněna venkovními klimatickými podmínkami a tepelná ztráta bude nahrazena přívodem venkovního vzduchu. Zdrojem tepla bude tepelné čerpadlo země – voda se suchým zemním vrtem. Také se proměří a posoudí chování tepelného čerpadla především v závislosti na venkovní teplotě v období prováděného experimentu. Naměřená data budou porovnána a vyhodnocena s údaji získanými vytvořením matematického modelu v prostředí simulačního programu TRNSYS.

Spojení na autorku:

snesvadbova@seznam.cz; mobil 737 477 441.

Použité zdroje:

- [1] Nesvadbová, S.: Studie dynamiky systému tepelné čerpadlo-otopná soustava. *Diplomová práce*. ČVUT, Praha 2003. 100 s.
- [2] Bašta, J.: Otopné plochy. 1. Vydání. *Kniha ČVUT*, Praha 2001. 328 s.
- [3] Kalema, T., Haapala, T.: Effect of interior heat transfer coefficient on thermal dynamics and energy consumption. *Energy and building* 22 (1995), s. 101–113.
- [4] Madsen, H., Holst, J.: Estimation of continuous-time models for the heat dynamics of a building. *Energy and building* 22 (1995), s. 67–79.
- [5] Andersen, K. K., Madsen, H., Hansen, H. L.: Modelling the heat dynamics of a building using stochastic differential equation. *Energy and building* 31 (2000), s. 13–24. ■