

Přesvědčivost výsledků výpočtu potřeby tepla na vytápění pasivních domů

Pavel Kopecký, Kamil Staněk, Jan Antonín, ČVUT, Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6
Tel.: +420 224 354 473, e-mail: pavel.kopecky@fsv.cvut.cz

Abstrakt

Do modelu výpočtu potřeby tepla na vytápění vstupuje mnoho parametrů, které jsou vypočteny/voleny s určitou nejistotou. Jednou ze značných nejistot výpočtu potřeby tepla na vytápění může být samotná osoba uživatele výpočtového modelu. Tento příspěvek se zabývá vlivem nejistot ve vstupních parametrech výpočtového modelu a vlivem uživatele na výsledky výpočtu potřeby tepla na vytápění. Výpočet potřeby tepla na vytápění modelového velmi dobře izolovaného rodinného domu byl zkoumán pomocí srovnávacího testu, kterého se zúčastnili někteří kolegové z Katedry konstrukcí pozemních staveb. Na tento test navazuje analýza nejistot a citlivostní analýza výpočtového modelu provedená s pomocí simulace Monte Carlo. Výsledky ukazují na nezanedbatelné rozdíly mezi jednotlivými uživateli, uživatel sám o sobě může být značným zdrojem chyb. Výsledkem simulace Monte Carlo je zjištění jak nejistoty vstupních parametrů ovlivňují výsledky výpočtu.

Klíčová slova

pasivní dům, výpočet potřeby tepla, analýza nejistot, simulace Monte Carlo

1. Úvod

Výpočet potřeby tepla na vytápění se provádí zejména za účelem a) posouzení shody s předpisy, b) porovnávání návrhových variant anebo c) posouzení plánovaných či realizovaných úsporných opatření.

Výpočet potřeby tepla na vytápění se obvykle provádí dle metodiky [1] po jednotlivých měsících. Zejména v německy mluvících zemích se prosadil tzv. výpočet dle metodiky PHPP [2], jehož principy však vycházejí z [1]. Výpočet dle [1] je založen na uvažování ustáleného teplotního stavu v jednotlivých měsících, dynamické efekty jsou zjednodušeně uvažovány pomocí tzv. faktoru využitelnosti tepelných zisků (pouze část tepelných zisků je skutečně využitelná). Hlavními výstupy z výpočtu jsou komponenty tepelné bilance a) tepelné ztráty prostupem a větráním v průběhu roku, b) využitelné tepelné zisky (solární a vnitřní) v průběhu roku a následně c) potřeba tepla na vytápění během roku.

Tepelné ztráty pasivních domů jsou velmi malé, tepelné zisky proto zpravidla kryjí značný podíl tepelných ztrát dle velikosti, orientace, stínění oken a v neposlední řadě optimismu výpočtu. Potřeba tepla na vytápění je tak výsledkem odčítání dvou podobně velkých čísel a relativní chyba stanovení výsledné potřeby tepla na vytápění proto může být nepříjemně vysoká. Informativní příloha H normy EN ISO 13790 doporuču-

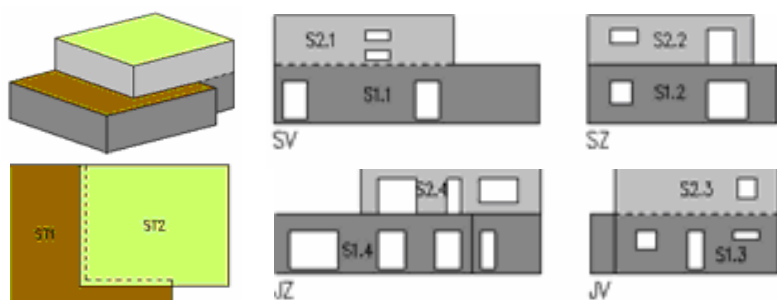
je provádět analýzu nejistot výpočtu tehdy, když je roční potřeba tepla na vytápění nižší než třetina ročních tepelných ztrát (*Pozn.: v textu je pojmem ztráta míněna potřeba tepla na krytí tepelné ztráty, jednotky jsou tedy kWh. Viz také tabulka 3.*). Informativní příloha H normy 13790 rovněž uvádí, že rozdíl výsledků výpočtu mezi jednotlivými uživateli může činit až 20 % pro stejné budovy v identickém klimatu.

Metodika hodnocení nízkoenergetických rodinných domů [3] stanovuje „napevno“ některé parametry ve výpočtu potřeby tepla na vytápění (např. se jedná o klimatická data, stanovení množství větracího vzduchu, velikost vnitřních zisků). I přes toto odstranění některých volných vstupních parametrů, vstupuje do výpočtu několik parametrů, které jsou vypočteny/voleny s určitou nejistotou.

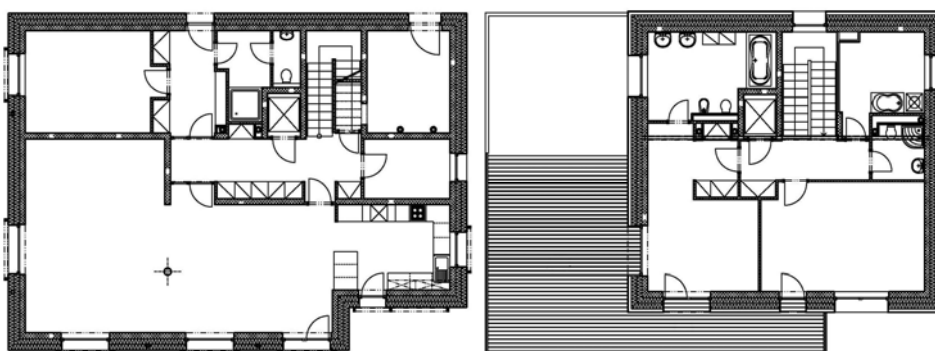
Článek se zejména věnuje hledáním odpovědi na následující otázky. Jaký vliv mají samotní uživatelé na výsledky výpočtu potřeby tepla na vytápění? (*Pozn.: v textu je uživatelem označována osoba provádějící výpočet*). Je sám uživatel největším zdrojem chyb a rozdílů ve výsledcích? Jaký vliv mají nejistoty vstupních parametrů na výsledky výpočtu potřeby tepla na vytápění?

2. Vliv uživatele

Srovnávací výpočet potřeby tepla na vytápění je proveden pro novostavbu nepodsklepeného rodinného domu se dvěma nadzemními podlažími (Obrázek 1 a 2). Dům odpovídá svým stavebním řešením standardu pasivního domu dle [2]. Pro stanovení potřeby tepla mohlo být využito jakéhokoliv výpočetního softwaru, jehož výpočetní postup vychází z metodiky [1]. Účastníkům testu (seznam viz Tabulka 1) byly poskytnuty totožné podklady. Nikdo ze zúčastněných neprováděl výpočet potřeby tepla poprvé, všichni jsou poměrně podrobně obeznámeni s pozadím výpočtů (tj. nejde o reprezentativní vzorek z lidské populace). Seznam vstupních parametrů do výpočtu je uveden v Tabulce 2. Některé vstupní parametry byly zadány napevno, některé musely být uživatelem zvoleny nebo dopočteny. Pokud někdo z pečlivějších potřeboval pro svůj výpočet doplňující informace (např. považoval projektovou dokumentaci za nedostatečnou), byly mu poskytnuty. Výstupní parametry, které uživatelé poskytovali pro vyhodnocení, jsou uvedeny v Tabulce 3. Z dílčích výsledků jednotlivých uživatelů (hodnoty Q_i , Q_s+Q_i , viz Tabulka 3) byly ještě dopočteny potřeby tepla na vytápění pro kombinace každý s každým (49 variant, viz obrázek 2) s přepočtením faktoru využitelnosti zisků (odvozuje se z poměru zisk/ztráta a z časové konstanty zóny).



Obr. 1: Hmotu objektu a pohledy na jednotlivé fasády



Obr. 2: Půdorys 1.NP (vlevo) a 2.NP (vpravo)

Tab. 1: Účastníci testu

označení	používaný software	čas strávený výpočtem
1	Energie 2008	7 h
2	vlastní excel	7 h
3	vlastní excel	3 h
4	Energie 2008	12 h
5	Energie 2008	5 h
6	vlastní excel	15 h
7	excel PHPP	10 h

Tab. 2: Definice vstupních parametrů ve srovnávacím testu

1	klimatická data	dle metodiky [3]
2	časová konstanta budovy	volba uživatele
3	počet osob	5 osob
4	požadovaná vnitřní teplota	20 °C
5	objem vytápěné zóny	dle podkladů
6	vytápěná podlahová plocha	dle podkladů
7	plochy obvodových konstrukcí	dle podkladů
8	orientace obvodových konstrukcí ke světovým stranám	dle podkladů
9	součinitele prostupu tepla obvodových konstrukcí	dle podkladů
10	započtení tepelných vazeb a mostů	volba uživatele
11	součinitel prostupu tepla zasklení	0.6 W/(m ² ·K)
12	součinitel prostupu tepla rámu	0.9 W/(m ² ·K)
13	energetická propustnost zasklení	0.5
14	plastový distanční rámeček	-
15	koeficient F_r (vliv rámu)	dle podkladů
16	koeficient F_c (vliv clonění)	dle podkladů
17	koeficient F_o (vodorovná markýza)	dle podkladů
18	koeficient F_f (svislá žebra)	dle podkladů
19	koeficient F_h (horizont)	dle podkladů
20	plocha podlahy na terénu	dle podkladů
21	exponovaný obvod podlahy	dle podkladů
22	tloušťka obvodové stěny	dle podkladů
23	tepelná vodivost zeminy	2 W/(m·K)
24	tepelný odpor podlahové vrstvy	dle podkladů
25	tloušťka okrajové izolace	dle podkladů
26	tepelná vodivost izolace	volba uživatele
27	hloubka okrajové izolace	dle podkladů
28	Objemový tok větracího vzduchu	dle metodiky [3]
29	n_{50}	0.6 1/h
30	koeficient e	dle metodiky [3]
31	koeficient f	dle metodiky [3]
32	účinnost rekuperace	85 %
33	vnitřní tepelné zisky	dle metodiky [3]

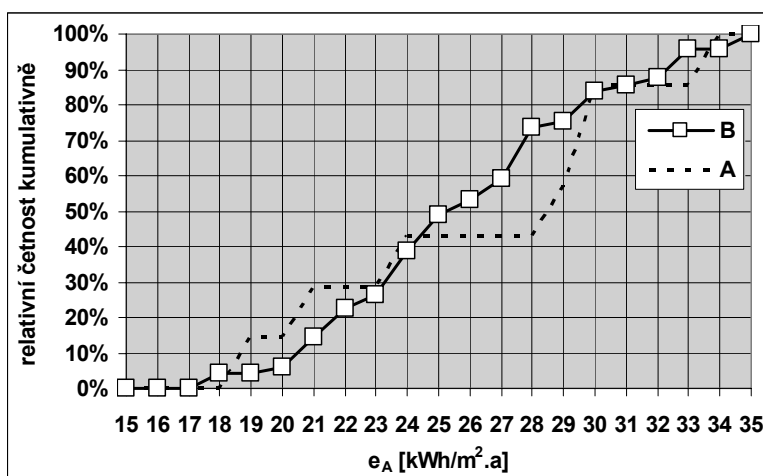
Tab. 3: Sledované výstupní parametry

1	součinitel prostupu tepla jednotlivých konstrukcí	W/(m ² .K)
2	poměr A/V	m ² /m ³
3	celková plocha netransparentních obvodových konstrukcí (i s podlahou na zemině)	m ²
4	celková plocha oken	m ²
5	měrná tepelná ztráta prostupem	W/K
6	měrná tepelná ztráta větráním	W/K
7	po měsících tepelné ztráty Q _i (12 hodnot)	kWh
8	po měsících solární zisky Q _s (12 hodnot)	kWh
9	po měsících vnitřní zisky Q _i (12 hodnot)	kWh
10	po měsících faktor využitelnosti tepelných zisků (12 hodnot)	-
11	po měsících potřeba tepla na vytápění Q _h (12 hodnot)	kWh
12	měrná potřeba tepla na vytápění e _A	kWh/(m ² .rok)
13	měrná potřeba tepla na vytápění e _V	kWh/(m ³ .rok)
14	průměrný součinitel prostupu tepla U _{em}	W/(m ² .K)

Tab. 4: Souhrn výsledků ze srovnávacího testu

uživatel	1	2	3	4	5	6	7	průměr
Q _i [kWh]	16176	14541	15278	16344	14823	13982	13245	14913
Q _s [kWh]	10626	9698	7425	9156	8726	11515	10581	9675
Q _i [kWh]	3507	3504	3504	3504	3504	3571	4547*	-
Q _h [kWh]	7270	5747	7295	8371	7057	5223	4483	6492
e _A [kWh/m ² .a]	29	23	29	34	28	21	18	26

* Výpočtový excel PHPP neumožňuje zadání vnitřních zisků podle [3].



Obr. 3: Relativní četnost měrné potřeby tepla na vytápění (A – pouze z výsledků jednotlivých uživatelů; B – po kombinaci každý s každým)

3. Analýza nejistot

Mimo nejistot způsobené uživateli vstupují do výpočtu další nejistoty. Jedná se zejména o: a) nejistoty ve formulaci modelu (model je vždy pouze přiblížením reality – zjednodušení a aproximace), b) nejistoty v hodnotách vstupních parametrů (nedostupnost údajů, rozptyl fyzikálních vlastností) a c) numerické nejistoty (numerické chyby vlivem diskretizace, případně zaokrouhlování).

Cílem této kapitoly je zjistit nejistotu stanovení potřeby tepla na vytápění modelového domu s pomocí stochastické metody Monte Carlo. Metoda Monte Carlo je založena

na mnohonásobném opakování výpočtu (v příkladu bylo využito excelu uživatele 6), kdy definované vstupní parametry jsou generovány náhodně (pomocí zvolené vzorkovací metody) z oblasti volených rozdělení pravděpodobnosti. Metoda obecně zahrnuje následující kroky: a) výběr rozdělení pravděpodobnosti pro sledované vstupní parametry (obvykle voleno Gaussovo rozdělení), b) vygenerování sady vzorků z jednotlivých rozdělení (matice o x_n vstupních parametrech a S simulacích), c) opakování výpočtu a ukládání matice o y_k sledovaných výstupních parametrech a S simulacích, d) analýza nejistot, a případně e) citlivostní analýza. Pro další informace je čtenář odkázán na [4].

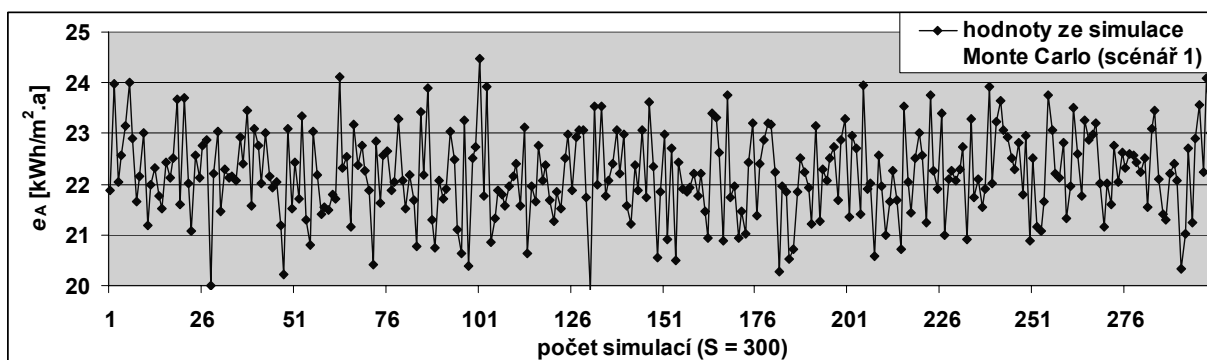
Mimo nejistot vstupních parametrů byly do výpočtu vneseny tyto scénáře:

- (1) výpočet dle metodiky [3],
- (2) jako 1 s klimatickými daty pro Hradec Králové,
- (3) jako 2 bez tepelných mostů,
- (4) jako 3, s vnitřními zisky o 25 % výše než dle metodiky [3],
- (5) jako 1, změna procenta prosklení JZ fasády (5a – plocha JZ oken x 1,15, 5b – plocha JZ oken x 0,85).

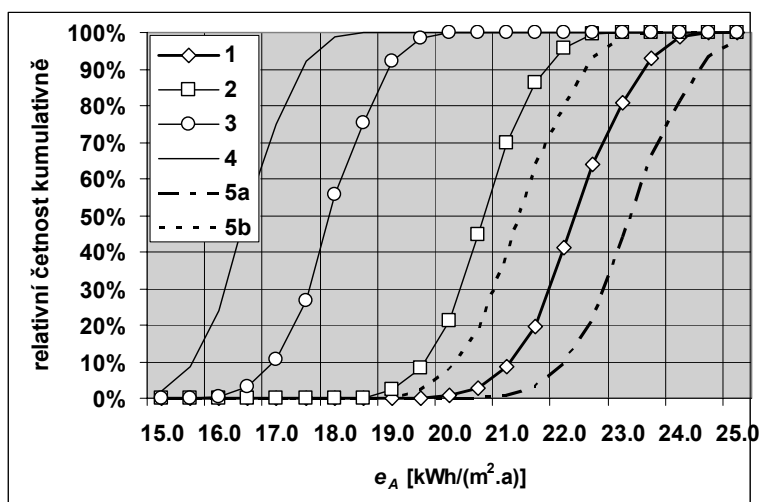
Pozn.: Scénáře také představují nejistoty. Je například Praha tak rozdílná od Hradce Králové, jak ukazuje srovnání jejich klimatických dat?

Tab. 6: Definice nejistot vstupních parametrů pro simulaci Monte Carlo (rozdíly ve vstupních parametrech získané z výsledků srovnávacího testu slouží k odhadu pravděpodobnostního rozdělení pro Monte Carlo).

	název	jednotka	zvolené rozdělení	střední hodnota	směrod. odchylka
1	časová konstanta zóny	[h]	normální	200	15
2	souč. prostupu tepla stěn 1.NP	[W/(m ² ·K)]	normální	0,13	0.005
3	souč. prostupu tepla stěn 2.NP	[W/(m ² ·K)]	normální	0,16	0.005
4	souč. prostupu tepla střechy 1.NP	[W/(m ² ·K)]	normální	0,10	0.005
5	souč. prostupu tepla střechy 2.NP	[W/(m ² ·K)]	normální	0,10	0.005
6	souč. prostupu tepla podlahy	[W/(m ² ·K)]	normální	0,19	0.005
7	souč. prostupu tepla rámu okna	[W/(m ² ·K)]	normální	0,90	0.025
8	souč. prostupu tepla zasklení	[W/(m ² ·K)]	normální	0,60	0.025
9	lineární činitel – vliv rámečku	[W/(m·K)]	normální	0,02	0.002
10	celková tepelná propustnost zasklení	[-]	normální	0,50	0.020
11	součinitel stínění horizont JV	[-]	normální	0,95	0.015
12	součinitel stínění horizont JZ	[-]	normální	0,95	0.015
13	součinitel stínění horizont SZ	[-]	normální	0,95	0.015
14	součinitel stínění horizont SV	[-]	normální	0,95	0.015



Obr. 4: Měrná potřeba tepla na vytápění – ukázka hodnot z jednotlivých kroků simulace Monte Carlo



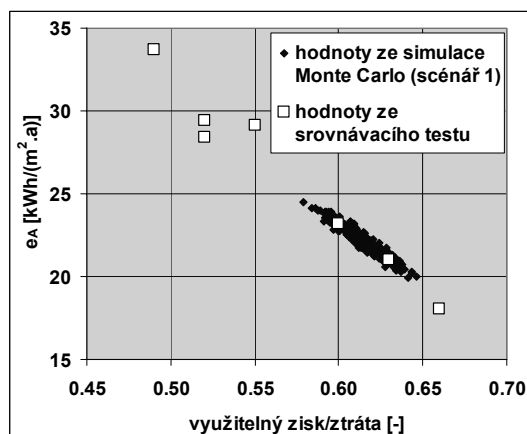
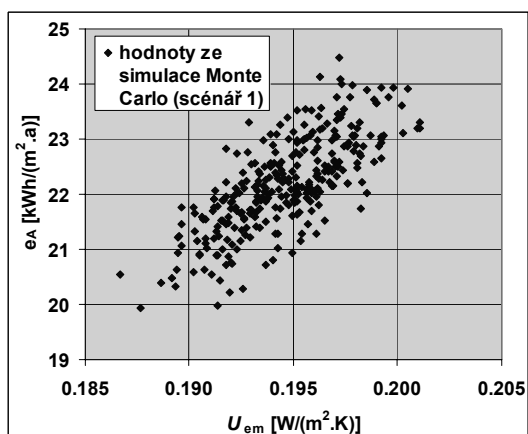
Obr. 5: Kumulativní relativní četnost měrné potřeby tepla na vytápění pro definované scénáře

4. Komentáře

Ačkoliv bylo využito dobře definované zjednodušené metody výpočtu, měrná potřeba tepla na vytápění jednotlivých uživatelů se pohybovala v relativně širokém rozmezí $\pm 30\%$ od průměrné hodnoty. Zdá se, že lidský faktor je ve výpočtech velmi důležitou okrajovou podmínkou. Rozdíly například vznikaly z chyb a nepozornosti uživatele (opomenutí, překlepy při zadání), při tvorbě modelu budovy (např. zanedbání důležitého), při výpočtu ploch a objemů, součinitelů prostupu tepla a volbou/výpočtem stínících koeficientů.

Volba hodnot součinitelů prostupu tepla zaručuje dosažení určité úrovně potřeby tepla, snižování samozřejmě vede ke snížení e_A (viz obrázek 6 vlevo). Zdánlivé detaily ale rozhodují, zda se z této globální úrovně dostaneme na ještě nižší hodnoty.

Například důvodem snížení potřeby tepla po odebrání tepelných mostů (snížení tepelných ztrát) je zvýšení poměru zisk/ztráta. Snižuje se tím sice faktor využitelnosti (využitelné tepelné zisky jsou o trochu nižší), výsledná potřeba tepla na vytápění je ale nižší než v případě scénáře s tepelnými mosty (redukce tepelných ztrát převažuje nad redukcí využitelných zisků). Naopak, proto se „téměř nic neděje“, když je zvyšováno procento prosklení JZ fasády. Tímto krokem je sice zvyšován zisk, ale zároveň i ztráta a tak jejich poměr zůstává podobný (v případě oken pro pasivní domy).



Obr 6: Vlevo – korelace mezi průměrným součinitelem prostupu tepla U_{em} a měrnou potřebou tepla na vytápění e_A . Vpravo – korelace mezi poměrem poměrem využitelný zisk/ztráta ($\eta \cdot (Q_s + Q_i) / Q_i$) a měrnou potřebou tepla na vytápění e_A .

5. Závěr

Výsledky srovnávacího testu ukázaly, že osoba uživatele může být značným zdrojem nejistoty výpočtu potřeby tepla na vytápění. Pro minimalizaci rizika chyb plynoucích z nepochopení metodiky výpočtu a nedostatečné kontroly nad vstupními daty je vhodné používat dostatečně jednoduché a transparentní modely. Žádný vstupní parametr výpočtu by neměl za sebou mít nejasné nebo neznámé pozadí.

Každý výpočetní model je zatížen určitou nejistotou. Relativní nejistota stanovení výsledku (vlivem velmi nízko položené srovnávací hladiny) je u výpočtu potřeby tepla na vytápění nízkoenergetických či pasivních domů značná. I při optimisticky zvoleném spíše úzkém rozmezí nejistot vstupních parametrů (viz Tabulka 6) se výsledná hodnota potřeby tepla pohybovala v rozmezí 5 kWh/(m²·a), viz obrázek 5.

Výpočet, zda je dům pasivní či nikoli, je smluvní postup, který nakonec s realitou nemusí mít příliš společného. Pro návrh domu je ale vhodný a nutný, protože poskytuje poměrně rychlou kontrolu projektovaného stavu [5]. Doposud patrně neexistuje jednoduchá metoda výpočtu, která by měla lepší rozlišovací schopnost. Tato skutečnost by měla být vzata v úvahu při vyhodnocování výsledků výpočtu, ale i v samotné definici pasivního domu.

6. Poděkování

Tento výsledek byl získán za finančního přispění MŠMT ČR, projekt 1M6840770001, v rámci činnosti výzkumného centra CIDEAS.

7. Literatura

- (1) ČSN EN ISO 13790 „*Tepelné chování budov – výpočet potřeby energie na vytápění a chlazení*“
- (2) Passivhaus Institut, PHPP 2007: *Passivhaus Projektierungs Paket 2007* (www.passiv.de)
- (3) TYWONIAK, J.: *Metodika výpočtu a hodnocení nízkoenergetických rodinných domů*, In: *Tepelná ochrana budov 2/2008*.
- (4) SALTELLI, CHAN, SCOTT: *Sensitivity Analysis*, Wiley, 2000.
- (5) NOVÁK, J.: *Možnosti praktického využití výpočtu potřeby tepla na vytápění*. Sborník konference Pasivní domy 2008.