

doc. Ing. Tomáš MATUŠKA, Ph.D.¹
Ing. Bořivoj ŠOUREK, Ph.D.²

¹ ČVUT v Praze, Fakulta strojní,
Ústav techniky prostředí

² ČVUT v Praze, Univerzitní
centrum energeticky efektivních
budov

Revize TNI 73 0302 pro zjednodušené hodnocení solárních tepelných soustav

Revision TNI 73 0302 for Simplified Evaluation of Solar Thermal Systems

Recenzent

doc. Ing. Michal Kabrhel, Ph.D.

Příspěvek se zabývá revizí, technické normalizační informace TNI 73 0302 pro zjednodušené hodnocení solárních soustav v oblasti přípravy teplé vody. Cílem revize bylo přiblížit výsledky zjednodušeného výpočtu výsledkům pokročilých počítačových simulací v TRNSYS a zavést klimatické údaje, uvedené v TNI 73 0331 určené pro hodnocení budov. Výsledky výpočtu podle původní a revidované TNI jsou porovnány s výsledky počítačových simulací a také s výsledky výpočtu podle ČSN EN 15316-4-3 při uvažování stejných vstupních podmínek. Upravená metoda TNI 73 0302 vykazuje odchylku v rozsahu $\pm 8\%$, což je výrazně nižší odchylka než v případě původní metody TNI a ČSN EN 15316-4-3.

Klíčová slova: solární soustavy, solární tepelné zisky, solární podíl

The paper deals with revision of technical normalization directive TNI 73 0302 for simplified assessment of solar thermal systems for hot water preparation. The aim of the revision was to approximate the results of the simplified calculation procedure to the results of advanced computational simulation in TRNSYS, and introduce climate data presented in TNI 73 0331 for assessment of buildings. The results of calculations according to the original and revised TNI are compared with the results of computational simulations and also with results of calculation according to ČSN EN 15316-4-3, when considering identical input conditions. The revised method TNI 73 0302 shows a deviation in the range of $\pm 8\%$, which is considerably lower deviation than in the case of the original TNI and ČSN EN 15316-4-3.

Klíčová slova: solar systems, solar heat gains, solar fraction

ÚVOD

Pro potřeby bilančních výpočtů v rámci energetického posuzování solárních soustav v energetických auditech a posudcích byla v roce 2009 standardizována zjednodušená měsíční bilanční metoda v TNI 73 0302 [1]. Pro svou jednoduchost a zřetelnost se od roku 2010 stala referenční metodou při posuzování energetických přínosů solárních tepelných soustav v rámci podpory v Operačním programu Životní prostředí a v dotačním programu Zelená úsporám. Pro projektanty a energetické auditory byl vytvořen výpočetní program BalanceSS [2] vycházející z TNI 73 0302, který slouží jako jednoduchý a volně dostupný nástroj pro hodnocení. Zároveň byly vytvořeny výpočtové nástroje založené na programu BalanceSS pro potřeby dotačních programů Zelená úsporám a Nová zelená úsporám.

S rostoucím využíváním TN 73 0302 a v řadě případů nevhodným použitím pro srovnávání výpočtu a měření na realizovaných solárních soustavách postupně vyvstala potřeba úpravy metody za účelem zvýšení věrohodnosti výsledků výpočtu. Cílem revize bylo přiblížit výsledky výpočtu výsledkům referenčního simulačního výpočtu solárních soustav v programu TRNSYS [3]. V následujícím textu je představena úprava v oblasti přípravy teplé vody. Upravená metodika je nakonec na příkladech porovnávána jak se simulačními výpočty v TRNSYS, tak s výsledky podle evropské metodiky ČSN EN 15316-4-3 [4].

BILANČNÍ METODA V TNI 73 0302

Bilanční metoda je fyzikálně zřetelným postupem energetického hodnocení solárních soustav, který vede ke stanovení ročních tepelných zisků solární soustavy na základě porovnání teoreticky využitelných tepelných zisků solárních kolektorů a potřeby tepla, která má být kryta v jednotlivých měsících. Výpočtový postup je založen na bilanci potřeby tepla v dané aplikaci včetně tepelných ztrát, tepla dodaného solárními kolektory, tepelných ztrát solární soustavy a využitelnosti solárního tepla v dané

aplikaci. Výpočtový postup podle TNI 73 0302 je určen pro tři základní typy solárních soustav:

- ☐ solární soustavy pro přípravu teplé vody;
- ☐ kombinované solární soustavy pro přípravu teplé vody a vytápění;
- ☐ solární soustavy pro ohřev bazénové vody.

Výpočet založený na energetické bilanci využitelných měsíčních tepelných zisků solárních soustav je sice fyzikálně zřetelný, nicméně je do značné míry zjednodušený:

- ☐ střední teplota v kolektorech je v celém roce uvažována jako konstantní hodnota – neuvažuje se vliv poměru mezi tepelnými zisky instalované plochy kolektorů, velikostí zásobníku a odběrem tepla v jednotlivých měsících na provozní teplotu v kolektorech;
- ☐ tepelné ztráty solární soustavy se zahrnují paušální srážkou ze zisků – neuvažuje se skutečná úroveň tepelné izolace solárního zásobníku a rozvodů, předpokládá se kvalitní tepelně izolační standard;
- ☐ vliv optických charakteristik kolektoru (modifikátor úhlu dopadu) je paušálně zjednodušen v korekci celkových zisků kolektoru – nelze hodnotit solární soustavy s orientací kolektorů mimo rozsah 45° od jihu;
- ☐ nezohledňuje se velikost akumulačního zásobníku a nelze tedy vyhodnotit soustavy s extrémně malou nebo velkou plochou kolektorů, ale pouze v rozsahu solárního pokrytí přibližně od 30 do 75 %.

Proto stávající výpočet udává pouze přibližné výsledky. To má samozřejmě vliv na věrohodnost výpočtu a je nutné mít dostatečný nadhled nad výsledky. Je třeba se především vyhnout hodnocení soustav významně předimenzovaných, poddimenzovaných či jinak „nestandardních“, např. s příliš dlouhými rozvody. Na druhé straně, výhodou zjednodušené bilanční metody je minimum potřebných vstupních informací: pouze parametry solárního kolektoru (křivka účinnosti kolektoru a plocha kolektoru), potřeba tepla v měsíčním rozlišení a měsíční klimatické údaje. Cílem navržené úpravy v rámci revize bylo zachovat jednoduchost a zřetelnost bilanční metody a zároveň odstraněním paušálních tabelárních hodnot střední denní teploty v kolektorech a srážky ze zisků vlivem tepelných ztrát zajistit vyšší shodu výpočtu (do $\pm 10\%$) s výsledkem pokročilých počítačových simulací.

REFERENČNÍ MODEL

Pro vytvoření více než 100 variant solární soustavy pro přípravu teplé vody byl vytvořen referenční model, ve kterém vstupní parametry hlavních prvků (zásobník a jeho izolace, délka potrubí kolektorového okruhu, jeho dimenze a tloušťka jeho izolace) závisí na zvolené ploše solárních kolektorů A_k , podobně jako tomu je u praktického navrhování:

- objem zásobníku:

$$V_{aku} = 50 \cdot A_k \quad [l]$$

- tloušťka izolace zásobníku:

$$s_{iz,aku} = 50 \text{ mm pro } V_{aku} < 600 \text{ l}$$

$$s_{iz,aku} = 33 + 0,0295 \cdot A_k \text{ [mm] pro } V_{aku} \geq 600 \text{ l}$$

tepelná vodivost izolace byla uvažována 0,04 W/(m.K)

- průtok kolektorem:

$$\dot{V}_k = 50 \cdot A_k \text{ [l/h] pro } A_k \leq 20 \text{ m}^2 \text{ (včetně)}$$

$$\dot{V}_k = 20 \cdot A_k \text{ [l/h] pro } A_k > 20 \text{ m}^2$$

- průměr potrubí kolektorového okruhu:

$$d_i = \max \left(18; \sqrt[3]{\frac{4 \cdot \dot{V}_k}{3,6 \cdot \pi \cdot w}} \right) \text{ [mm]}$$

kde návrhová rychlost proudění $w = 0,5 \text{ m/s}$;

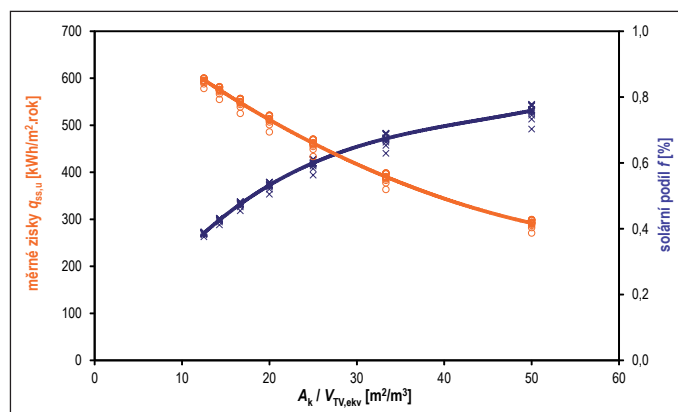
- délka potrubí kolektorového okruhu:

$$L_k = 25 + 2,5 \cdot A_k \text{ [m]}$$

z toho 50 % délky L_k je vedeno uvnitř budovy a 50 % venkovním prostředím;

- tloušťka izolace potrubí $s_{iz,p}$ je rovna průměru potrubí d_i při uvažování tepelné vodivosti 0,04 W/(m.K).

Plocha solárních kolektorů se u jednotlivých variant pohybuje od 2 m² do 75 m². Pro výpočet variant byl použit kvalitní plochý solární kolektor s konstantami křivky účinnosti $\eta_0 = 0,8$, $a_1 = 3,5 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$, $a_2 = 0,015 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^2)$ a modifikátorem úhlu dopadu $AM_{50^\circ} = 0,95$. Solární kolektory jsou uvažovány se sklonem 45° a orientací na jih. Jako základní návrhový případ solární soustavy pro přípravu teplé vody z 10 °C na 55 °C bylo zvoleno dimenzování 25 m²/m³ připravované teplé vody, tzn. denní odběr 40 l teplé vody na 1 m² zvolené kolektorové plochy. Další modelové varianty s různou hodnotou solárního pokrytí pro danou plochu kolektorů byly zvoleny pro 50 %, 75 %, 125 %, 150 %, 175 % a 200 % základního denního odběru. Varianty referenčního modelu solární soustavy pro přípravu teplé vody byly analyzovány v programu TRNSYS celoroční simulací



Obr. 1 Měrné využití zisky a solární podíl případů modelové solární soustavy v TRNSYS

provozního chování s hodinovým krokem a výsledky byly použity jako srovnávací reference.

Na obr. 1 jsou v grafické formě znázorněny výsledky simulovaných případů solární soustavy pro přípravu teplé vody v podobě měrných využitých zisků $q_{ts,u}$ a solárního podílu f . Graf odpovídá známému pravidlu: s rostoucím poměrem navržené plochy solárních kolektorů A_k k dennímu ekvivalentnímu odběru teplé vody $V_{TV,ekv}$, klesají roční měrné využití zisky soustavy a roste solární podíl (pokrytí potřeby tepla).

Poznámka: Objemem $V_{TV,ekv}$ [m³] se zde rozumí ekvivalentní denní odběr teplé vody normalizovaný na teplotní rozdíl 45 K a stanoví se z rovnice

$$V_{TV,ekv} = \frac{(1+z) \cdot V_{TV} \cdot \rho \cdot c \cdot (t_{TV} - t_{sv})}{\rho \cdot c \cdot (55 - 10)} = \frac{3,6 \times 10^6 \cdot Q_{p,TV}}{\rho \cdot c \cdot 45} \approx 0,019 \cdot Q_{p,TV} \quad [\text{m}^3/\text{den}] \quad (1)$$

kde je

V_{TV} denní objem připravované teplé vody [m³/den];

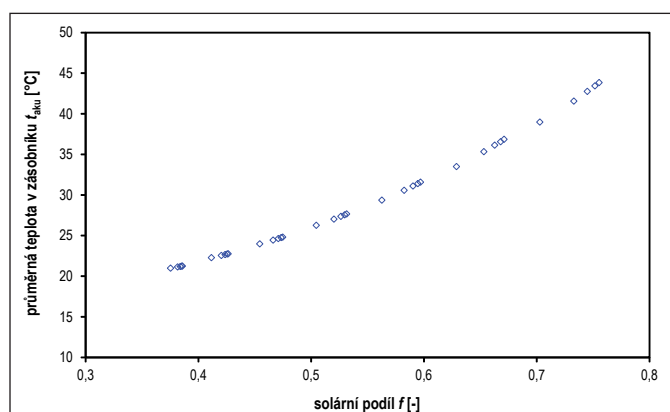
z přírážka na tepelné ztráty přípravy teplé vody;

$Q_{p,TV}$ celková potřeba tepla na přípravu teplé vody, včetně tepelných ztrát [kWh/den].

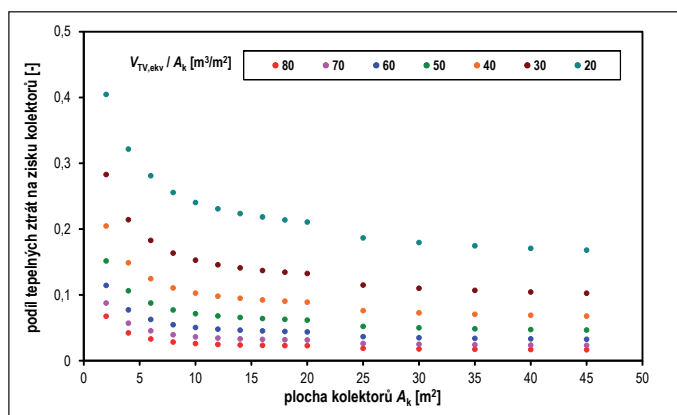
Na obr. 2 je znázorněna souvislost mezi průměrnou roční teplotou v zásobníku t_{aku} , určenou ze středních teplot jeho jednotlivých zón, a solárním podílem f . Graf odpovídá předpokládanému chování: s rostoucím dimenzováním na vyšší solární pokrytí potřeby tepla roste roční průměrná teplota v zásobníku teplé vody. Pro průměrnou teplotu v solárních kolektorech v době jejich provozu lze očekávat podobnou křivku, avšak posunutou do vyšších teplotních hladin.

Soubor křivek na obr. 3 ukazuje vliv plochy solárních kolektorů a dimenzování plochy vůči potřebě teplé vody na podíl tepelných ztrát soustavy. Trend ukazuje, že s dimenzováním na vyšší solární pokrytí, zde vyjádřené poměrem ekvivalentního denního objemu $V_{TV,ekv}$ připravované teplé vody k ploše solárních kolektorů A_k , roste podíl tepelných ztrát. Zároveň platí, že podíl tepelných ztrát je menší u solárních soustav s větší plochou solárních kolektorů. Z tohoto pohledu jsou nejméně účinné nejmenší solární soustavy s jednotkami kusů solárních kolektorů, kde podíl tepelných ztrát může být i větší než 20 %.

V podstatě všechny tři trendy výsledků byly zjednodušeným způsobem zahrnuty již v původní metodice podle TNI 73 0302, avšak paušálním způsobem v podobě tabulky pro střední denní teplotu v solárních kolektorech $t_{k,m}$ během roku v závislosti na předpokládaném solárním



Obr. 2 Souvislost mezi teplotou zásobníku (soustavy) a solárním podílem u případů modelové solární soustavy v TRNSYS



Obr. 3 Vliv plochy kolektorů a dimenzování na podíl tepelných ztrát soustavy

podílu f a tabulky pro srážku z tepelných zisků solárních kolektorů vlivem tepelných ztrát soustavy p v závislosti na navržené ploše kolektorů A_k . Praxe ukázala, že rozdělení je příliš hrubé a nezohledňuje komplexní souvislosti, např. srážka ze zisků vlivem tepelných ztrát významně závisí nejen na velikosti plochy kolektorového pole A_k , ale i na způsobu dimenzování, tj. poměru $A_k/V_{TV,ekv}$.

NÁVRH ÚPRAV METODIKY

Pro zpřesnění výsledků zjednodušené bilanční metody bylo v případě přípravy teplé vody navrženo nahradit v TNI 73 0302 tabulky pro srážku z tepelných zisků solárních kolektorů vlivem tepelných ztrát p a tabulky pro střední denní teplotu $t_{k,m}$ v solárních kolektorech rovnicemi, které postihují uvedené vlivy lépe a zároveň plynule již od plochy solárních kolektorů 2 m².

Pro srážku z tepelných zisků solárních kolektorů vlivem tepelných ztrát byl navržen vztah

$$p = \frac{0.26}{A_k} + 100 \frac{A_k}{Q_{p,c}} \quad [-] \quad (2)$$

kde je

$Q_{p,c}$ roční potřeba tepla v aplikaci (na přípravu teplé vody) pro krytí solární soustavou [kWh/rok];

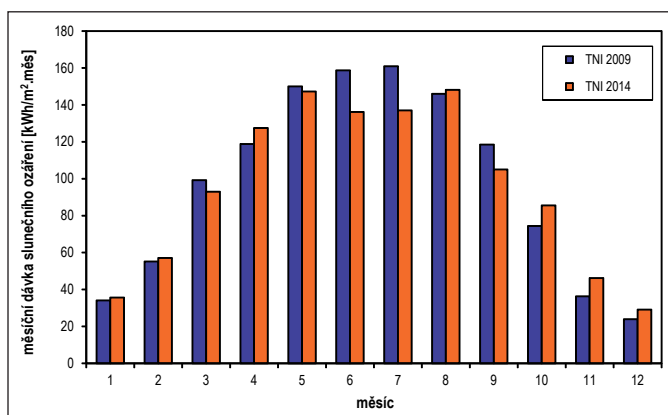
A_k plocha kolektorů [m²].

Poznámka: Jako plocha solárního kolektoru může být uvažována plocha absorberu, plocha apertury nebo hrubá plocha kolektoru. Zatímco současná verze normy pro zkoušení solárních kolektorů ČSN EN 12975-2 vztahuje účinnost kolektoru k ploše absorberu nebo ploše apertury, připravená novela ČSN EN ISO 9806 vztahuje již účinnost pouze k hrubé ploše kolektoru. Každé ploše odpovídá jiný soubor koeficientů křivky účinnosti η_0 , a_1 a a_2 . Pro účely výpočtu nezáleží, která plocha kolektoru je uvažována. Je však nezbytné ve výpočtu uvažovat koeficienty křivky účinnosti odpovídající zvolené ploše.

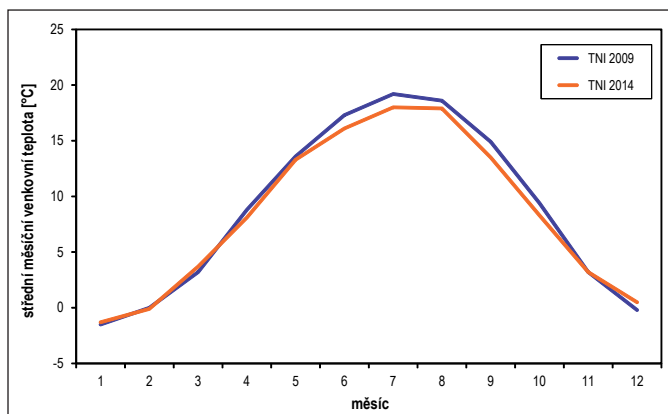
Pro střední denní teplotu v solárních kolektorech byl navržen vztah

$$t_{k,m} = 25 + 11000 \cdot \frac{A_k}{Q_{p,c}} \quad [^\circ\text{C}] \quad (3)$$

Do přílohy revize TNI 73 0302 byly přepracovány klimatické údaje o měsíčních dávkách slunečního ozáření pro různě skloněné a orientované plochy a průměrných měsíčních teplotách pro uvedení do souladu s klimatickými údaji uvedenými v TNI 73 0331 [5]. Rozdíl mezi původ-



Obr. 4 Porovnání měsíčních dávek slunečního ozáření v obou verzích TNI 73 0302



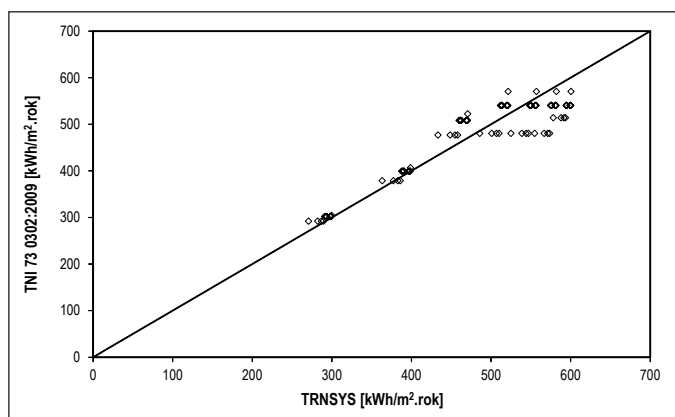
Obr. 5 Porovnání středních měsíčních venkovních teplot v obou verzích TNI 73 0302

ními a novými klimatickými údaji je zobrazen v grafech na obr. 4 a 5. Celková roční dávka slunečního ozáření na plochu jižně orientovanou se sklonem 45° je u nových klimatických údajů o cca 2 % nižší. V letním období (červen, červenec) je dávka slunečního ozáření nižší o 15 %. Průměrná roční venkovní teplota je pro nové klimatické údaje o cca 0,4 K nižší. Lze předpokládat, že uvedená změna klimatických údajů nebude mít na hodnocení běžně navrhovaných solárních soustav podstatný vliv.

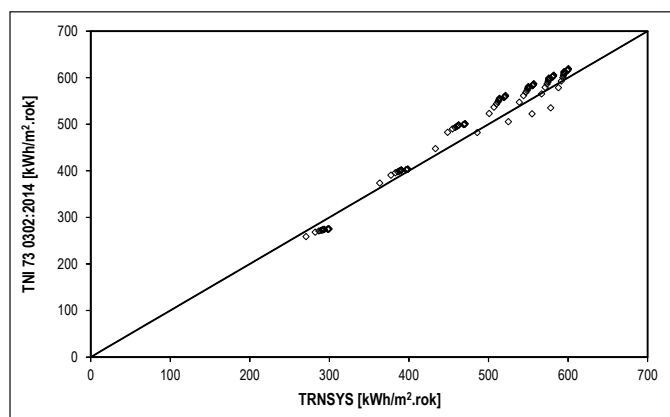
POROVNÁNÍ METOD

Pro varianty referenční modelové solární soustavy pro přípravu teplé vody popsané výše a hodnocené simulačním výpočtem v TRNSYS byly provedeny výpočty původní bilanční metodou a nově upravenou. Zároveň byly pro srovnání varianty hodnoceny i metodou podle normy ČSN EN 15316-4-3. Výsledky zjednodušených metodik byly porovnány s výsledky simulačního výpočtu. Všechny výpočty byly provedeny s identickými klimatickými údaji, aby byly zachovány stejné okrajové podmínky výpočtu.

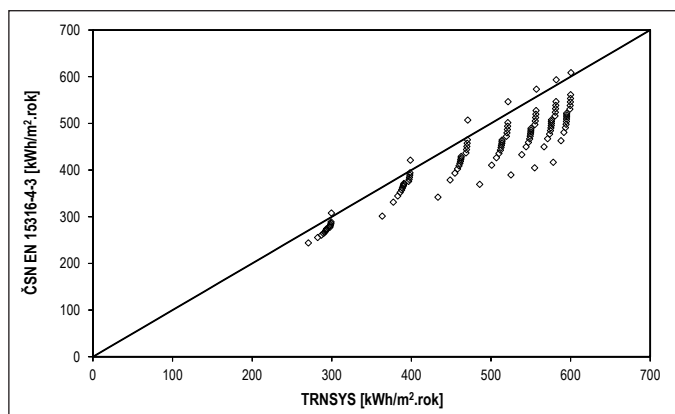
Původní metoda podle TNI 73 0302:2009 vykazuje podle očekávání relativně vysokou odchylku měrných solárních zisků pohybující se od -16 % do +11 % (viz obr. 6). Přestože metoda podle ČSN EN 15316-4-3 umožňuje do hodnocení solární soustavy zahrnout takové detailní informace jako je objem zásobníku V_{aku} [m³], měrná tepelná ztráta potrubí kolektorového okruhu $U-L$ [W/K], modifikátor úhlu dopadu IAM či měrný výkon výměníku UA_{hx} [W/K], výsledky výpočtu jsou ve srovnání s počítačovou simulací výrazně odlišné (viz obr. 7). Odchylka se pohybuje od -28 % do 8 %.



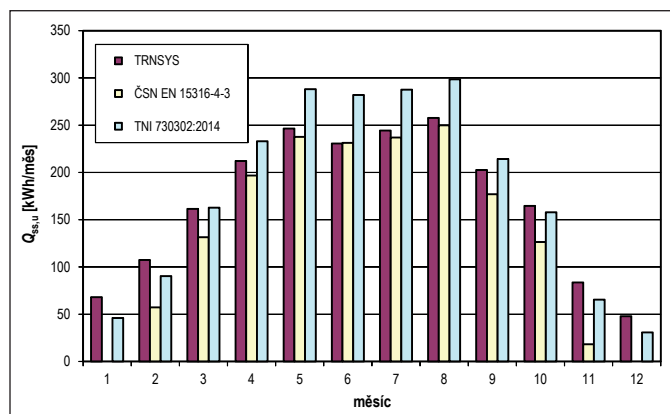
Obr. 6 Porovnání výsledků podle původní metodiky TNI 73 0302 z roku 2009 s výsledky v TRNSYS



Obr. 8 Porovnání výsledků podle revidované metodiky TNI 73 0302 s výsledky v TRNSYS



Obr. 7 Porovnání výsledků podle EN 15316-4-3 s výsledky v TRNSYS



Obr. 9 Porovnání výsledků pro případ rodinného domu

Nově upravená metoda podle TNI 73 0302:2014 vykazuje odchylku od simulačního výpočtu v rozsahu od -8 % do +8 % pro hodnotené varianty referenční solární soustavy (viz obr. 8). To je odchylka výrazně nižší ve srovnání s výpočtem podle původní TNI či podle ČSN EN 15316-4-3.

Pro detailní porovnání metod výpočtu byly využity dva konkrétní podrobně zadané příklady solárních soustav pro přípravu teplé vody, jedna pro rodinný dům s vyšším pokrytím, druhá pro bytový dům s nízkým pokrytím. Vstupní údaje jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1 Vstupní údaje pro srovnávací výpočet

Parametry	Rodinný dům	Bytový dům
Odběr teplé vody Přirážka na ztráty	160 l/den 0,15	2500 l/den 0,30
Počet kusů x plocha apertury	2 ks x 2,39 m ² = 4,8 m ²	20 ks x 1,867 m ² = 37,3 m ²
Parametry účinnosti kolektoru (k ploše apertury)	$\eta_0 = 0,759$ $a_1 = 3,48 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ $a_2 = 0,0161 \text{ W/(m}^2\text{K}^2)$ $IAM_{50^\circ} = 0,93$	$\eta_0 = 0,777$ $a_1 = 5,1 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ $a_2 = 0,014 \text{ W/(m}^2\text{K}^2)$ $IAM_{50^\circ} = 0,92$
Objem solárního zásobníku Tloušťka izolace zásobníku	240 l 50 mm; 0,04 W/(m.K)	1800 l 100 mm; 0,04 W/(m.K)
Průtok Průměr potrubí Tloušťka izolace rozvodů Délka potrubí	high-flow 50 l/(h.m ²) 22 x 1 mm 19 mm; 0,04 W/(m.K) 30 m vedeno uvnitř domu 10 m vedeno po střeše	low-flow 15 l/(h.m ²) 22 x 1 mm 19 mm; 0,04 W/(m.K) 70 m vedeno uvnitř domu 30 m vedeno po střeše

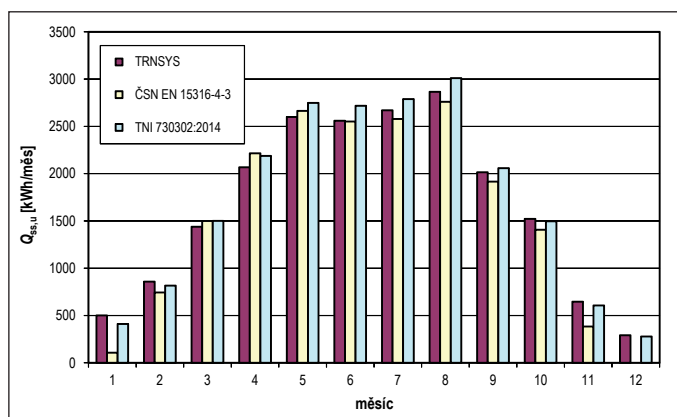
Pro obě solární soustavy byly vyhodnoceny měsíční hodnoty využitých solárních zisků (viz obr. 9 a obr. 10), celkové roční využitě zisky a solární podíl (viz tab. 2). U případu rodinného domu je patrné, že v zimním období vykazuje metoda podle evropské normy výrazně nižší zisky než simulační výpočet i metoda podle TNI, na druhé straně pro letní období je odchylka výraznější pro metodu podle TNI (o cca 15 až 20 %). Nicméně při celoročním porovnání přínosů solární soustavy je odchylka metody podle TNI 73 0302 pouze 6 % oproti odchylce 18 % metody podle EN 15316-4-3. U případu bytového domu jsou výsledky relativně srovnatelné. Výjimkou je opět podhodnocení zimního provozu u evropské normy. U celoročního přínosu solární soustavy jsou odchylky obou metod relativně malé: u TNI 73 0302 je odchylka pouze 3 %, u metody podle EN 15316-4-3 okolo 6 %.

Tab. 2 Výsledky srovnávacího výpočtu

Parametry	Rodinný dům	Bytový dům
TRNSYS	$Q_{ss,u} = 2027 \text{ kWh/rok}$ $f = 58 \%$	$Q_{ss,u} = 20,0 \text{ MWh/rok}$ $f = 32 \%$
EN 15 316-4-3	$Q_{ss,u} = 1663 \text{ kWh/rok}$ $f = 47 \%$	$Q_{ss,u} = 18,8 \text{ kWh/rok}$ $f = 30 \%$
TNI 73 0302:2014	$Q_{ss,u} = 2156 \text{ kWh/rok}$ $f = 61 \%$	$Q_{ss,u} = 20,6 \text{ kWh/rok}$ $f = 33 \%$

ZÁVĚR

V příspěvku byly představeny úpravy technické normalizační informace TNI 73 0302 pro zjednodušené hodnocení solárních soustav v oblasti přípravy teplé vody. Výsledky podle nové metody byly pro



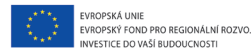
Obr. 10 Porovnání výsledků pro případ bytového domu

více než 100 variant referenční soustavy porovnány s výsledky počítačových simulací a výsledky výpočtové metody podle EN 15316-4-3 a byl stanoven rozsah odchylek výpočtových postupů. Pro revidovanou metodu podle TNI 73 0302 se odchylka od simulačního výpočtu pohybuje v rozsahu $\pm 8\%$, což je výrazně nižší odchylka než v případě původní metody TNI a platné ČSN EN 15316-4-3. Dále bylo provedeno podrobnější porovnání na dvou podrobně zadaných případech, které ukázalo, že přestože upravená metoda podle TNI 73 0302 vykazuje v průběhu letního období významnější odchylku, z hlediska celoročního výpočtu je odchylka v uvedených mezích (6 % pro rodinný dům, 3 % pro bytový dům).

Kontakt na autora: tomas.matuska@fs.cvut.cz

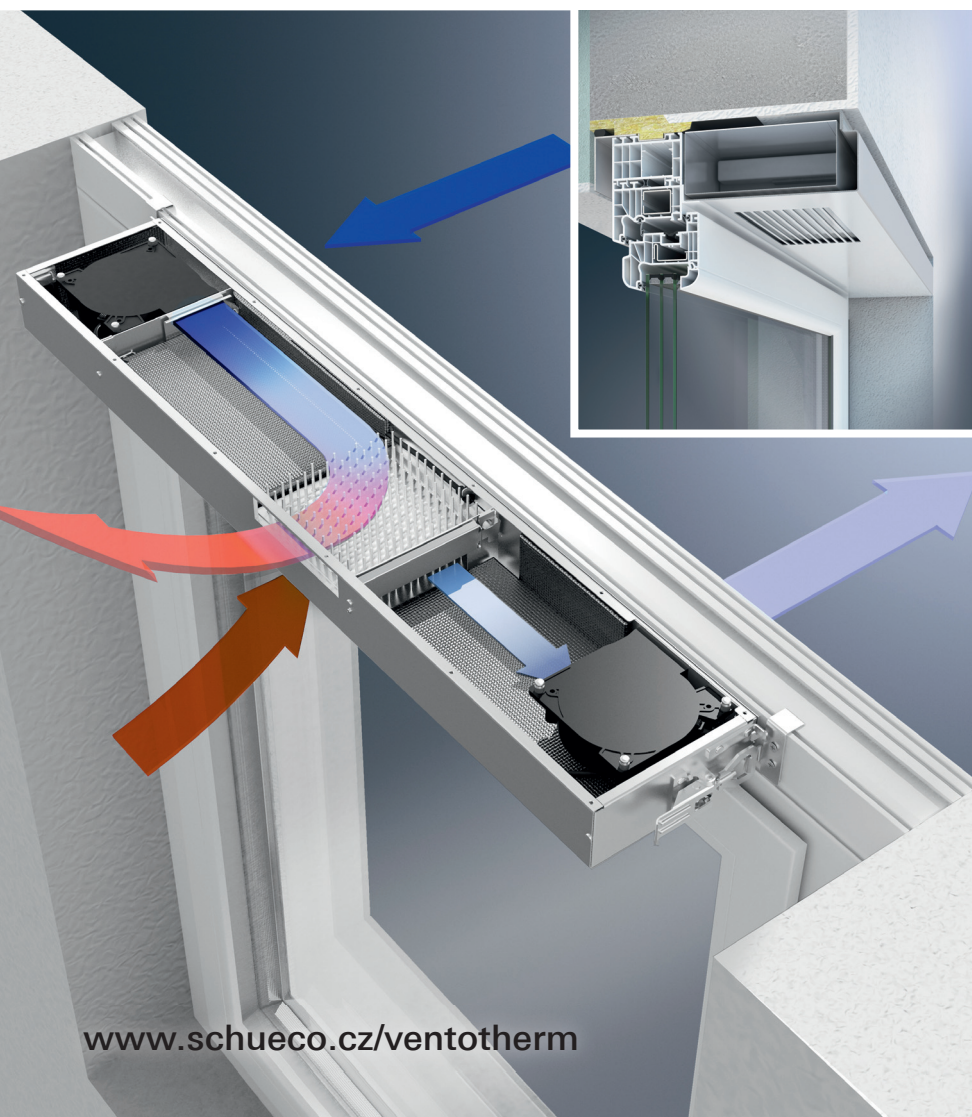
PODĚKOVÁNÍ

Tento příspěvek vznikl za podpory Evropské unie, projektu OP VaVpl č. CZ.1.05/2.1.00/03.0091 – Univerzitní centrum energeticky efektivních budov.



Použité zdroje:

- [1] TNI 73 0302. *Energetické hodnocení solárních tepelných soustav - Zjednodušený výpočtový postup*. ÚNMZ 2009.
- [2] MATUŠKA, T., ŠOUREK, B. *Program BILANCESS_5.6 pro zjednodušené energetické hodnocení solárních soustav v souladu s TNI 73 0302* [software]. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/~matustom/index.htm>
- [3] University of Madison. *Transient System Simulation Tool TRNSYS 17.1* [software]. [přístup od 2012]. Dostupné z: <http://www.trnsys.com>
- [4] ČSN EN 15316-4-3. *Tepelné soustavy v budovách – Výpočtová metoda pro stanovení energetických potřeb a účinnosti soustav – Část 4-3: Výroba tepla na vytápění, tepelné sluneční soustavy*. ČNI, 2008.
- [5] TNI 73 0331. *Energetická náročnost budov – Typické hodnoty pro výpočet*. ÚNMZ 2013.



Schüco
VentoTherm
Integrovaný
okenní
větrací systém
s rekuperací