

Ing. Yauheni KACHALOUSKI¹⁾
doc. Ing. Tomáš MATUŠKA, Ph.D.²⁾

¹⁾ Fakulta strojní, ČVUT v Praze
²⁾ ČVUT v Praze, Univerzitní
centrum energeticky efektivních
budov

Recenzent
Ing. Petr Wolf, Ph.D.

Tepelné modelování fotovoltaických modulů

Thermal Modelling of Photovoltaic Modules

Článek popisuje tepelný model fotovoltaického (FV) modulu. Pro tepelnou bilanci FV modulu a výpočet provozní teploty byly v simulační analýze použity různé formulace výpočtu součinitele přestupu tepla konvekcí vlivem větru. Výsledky výpočtu roční produkce elektrické energie byly vzájemně porovnány. Simulace okamžitého elektrického výkonu FV modulu při použití různých korelací se může lišit až o 15 %, na druhé straně je vliv na výpočet roční produkce potlačen a modely se liší do 5 %.

Klíčová slova: fotovoltaika, simulace výkonu, tepelný model

The paper describes the thermal model of a photovoltaic (PV) module. Various formulations to calculate the coefficient of heat transfer due to wind were used for thermal balance of the PV module and calculation of the operating temperature in the simulation analysis. The results of the calculation of the annual electricity production were compared with each other. Simulation of the instantaneous electrical power output of the PV module with use of different correlations can vary by up to 15 %. On the other hand, the effect on the calculation of annual production is suppressed and the models vary up to 5 %.

Keywords: photovoltaics, power output simulation, thermal model

ÚVOD

Tepelné chování fotovoltaických modulů bylo v minulém desetiletí široce zkoumáno [1], [2]. Teplota FV článků je funkcí mnoha faktorů, jako je sluneční ozáření dopadající na modul, teplota okolního vzduchu, rychlost okolo proudícího větru a jeho směr, konstrukce FV modulu, sklon modulu apod. Mnoho jednoduchých korelací pro teplotní závislost produkce nalezených v literatuře bylo shrnuto Skoplakim [3], studie teplotní závislosti produkce FV modulů v závislosti na použitých modelech byla provedena např. v [4].

Řada autorů z oblasti obálky budov, solárních tepelných kolektorů či fotovoltaických modulů se v minulosti soustředila na odvození korelací pro větrem vyvolaný přenos tepla konvekcí a jejich použití pro modelování tepelné bilance obecného povrchu vystaveného větru [5], [6]. Velice dobrá rešerše modelů konvekce vlivem větru byla představena Palyvosem [7]. Existuje mnoho přístupů zohledňujících rychlost větru a jeho směr [5] rozlišujících mezi náběžnou a závětrnou stranou povrchu a definujících součinitel přestupu tepla konvekcí pro přední a zadní část FV modulu [8]. Obecně přijetí jakékoli modelu pro stanovení součinitele přestupu tepla musí být zohledněno experimentální uspořádání, samotná metoda stanovení a okrajové podmínky pro použití vztahu [5], protože řada empiricky stanovených modelů vede k velice rozdílným výsledkům v produkci elektrické energie FV modulu [8].

Konvekce vlivem větru hraje významnou úlohu ve stanovení teploty FV článků, která ovlivňuje produkci elektrické energie, přitom modely pro vlastní výpočet se od sebe výrazně odlišují a vykazují relativně velký rozptyl. Proto byla provedena analýza, jak závisí vypočítaná produkce FV modulu na volbě modelu pro větrem vyvolaný přestup tepla konvekcí.

MATEMATICKÉ MODELY

Matematický model FV modulu je uvažován jako jednorozměrná tepelná bilance řešená iteračním přístupem pro stanovení teploty FV článků. Konstrukce FV modulu je uvažována s jedním zasklením, FV články zapouzdřenými mezi dvě vrstvy EVA materiálu a zadní ochrannou vrstvou z Tedlaru. Seznam parametrů jednotlivých vrstev je naznačen v tab. 1, údaje byly převzaty z různé literatury [9], [21].

Obecná energetická bilance FV modulu je popsána rovnicí (1) jako:

$$\frac{dQ}{d\tau} = \dot{W}_s - \dot{W}_r - \dot{W}_h - \dot{W}_e \quad (1)$$

kde je:

$dQ/d\tau$ změna tepelného obsahu FV modulu,
 $\dot{W}_s$ tok slunečního záření [W],
 $\dot{W}_r$ tok slunečního záření odraženého od FV modulu [W],
 $\dot{W}_h$ tepelný tok do okolí [W],
 $\dot{W}_e$ elektrický výkon FV modulu [W].

Tab. 1 Tepelné vlastnosti vrstev FV modulu

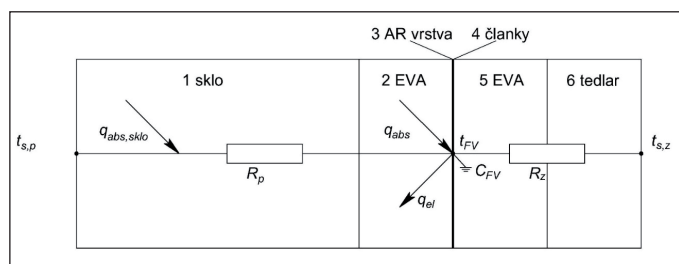
Tab. 1 Thermal properties of the PV module layers

Vrstva	Materiál	Tloušťka [mm]	Tepelný odpor [m ² K/W]	Tepelná kapacita [J/m ² .K]
Přední sklo	sklo	4	3,92	7900
Laminační fólie	EVA	0,5	1,43	920
FV články	c-Si	0,225	0.002	490
Laminační fólie	EVA	0,5	1,43	920
Zadní ochranná vrstva	Tedlar	0,25	1,25	423
Celkem		5,475	8,03	10563

Jak je patrné z tab. 1, vrstva skla má nejvyšší tepelný odpor a kapacitu, FV články nejmenší. Antireflexní vrstva byla kvůli velice nízkému odporu zanedbána. Pro účely modelu byly vrstvy agregovány do tří izotermních vrstev (vrstev se stejnou uvažovanou teplotou): přední vrstva, vrstva FV článků a zadní vrstva (viz obr. 1) s tepelnými odpory:

$$R_p = R_{sklo} + R_{EVA} \quad (2)$$

$$R_z = R_{EVA} + R_{Tedlar} \quad (3)$$



Obr. 1 Zjednodušená struktura FV modulu

Fig. 1 Simplified structure of the PV module

Zjednodušené schéma FV modulu je znázorněno na obr. 1 s tepelnými odpory naznačených vrstev. Přenos tepla lze pak popsat následovně:

- záření mezi předním sklem a oblohou, resp. záření mezi předním sklem a terénem, zadní ochrannou vrstvou a okolím (terén, střecha, obloha),
- volná a nucená konvekce na povrchu předního skla, resp. zadní ochranné vrstvy,
- vedení tepla přední vrstvou, resp. zadní vrstvou.

Bylo zavedeno několik předpokladů:

- celková tepelná kapacita C_{FV} je soustředěna do vrstvy FV článků (viz obr. 1),
- vlastnosti materiálů nejsou závislé na teplotě.

Dále byla provedena energetická bilance každé vrstvy. Pro zjednodušení rovnic byl tepelný odpor nahrazen tepelnou propustností $\Lambda = 1/R$.

Pro přední vrstvu:

$$0 = h_{c,p}(t_a - t_{s,p}) + h_{r,p,o}(t_o - t_{s,p}) + h_{r,p,gr}(t_{gr} - t_{s,p}) + \Lambda_p(t_{FV} - t_{s,p}) \quad (3)$$

Pro vrstvu FV článků:

$$C_{FV} \frac{dt_{FV}}{d\tau} = \Lambda_p(t_{FV} - t_{s,p}) + \Lambda_z(t_{FV} - t_{s,z}) + q_{abs} - q_{el} \quad (4)$$

Pro zadní vrstvu:

$$0 = h_{c,z}(t_a - t_{s,z}) + h_{r,z,o}(t_o - t_{s,z}) + h_{r,z,gr}(t_{gr} - t_{s,z}) + \Lambda_z(t_{FV} - t_{s,z}) \quad (5)$$

kde je:

- $h_{c,p}, h_{c,z}$ součinitel přestupu tepla konvekcí na přední, resp. zadní vrstvě $[W/m^2K]$,
- $h_{r,p,o}, h_{r,p,gr}$ součinitel přestupu tepla zářením mezi přední vrstvou a oblohou, resp. přední vrstvou a terénem $[W/m^2K]$,
- $h_{r,z,o}, h_{r,z,gr}$ součinitel přestupu tepla zářením mezi zadní vrstvou a oblohou, resp. zadní vrstvou a terénem $[W/m^2K]$,
- Λ_p, Λ_z tepelná propustnost přední vrstvy, resp. zadní vrstvy $[W/m^2K]$,
- q_{abs}, q_{el} tok energie pohlcený články, resp. generovaný články jako elektrický výkon $[W/m^2]$,
- t_a, t_o, t_{gr} teplota okolního vzduchu, oblohy a terénu $[^\circ C]$,
- $t_{s,p}, t_{s,z}, t_{FV}$ teplota povrchu přední vrstvy, zadní vrstvy a FV článků $[^\circ C]$,
- C_{FV} tepelná kapacita FV modulu $[J/m^2K]$.

Jelikož časová konstanta FV modulu byla zjištěna velice malá (do 20 min), byla další analýza využívající klimatické údaje v hodinovém kroku prováděna s uvažováním ustálených podmínek (člen $dQ/d\tau = 0$) [11].

Záření mezi FV modulem a oblohou, resp. terénem

Jelikož teplota oblohy není rovnoměrná, zavádí se ekvivalentní teplota oblohy, uvažující oblohu jako černé těleso. Součinitel přestupu tepla zářením mezi povrchem i a oblohou a mezi povrchem i a terénem je vyjádřen následovně:

$$h_{r,i,s} = \varepsilon_i \sigma F_{o,i} (T_o^2 + T_{s,i}^2) (T_o + T_{s,i}) \quad (6)$$

$$h_{r,i,gr} = \varepsilon_i \sigma F_{gr,i} (T_{gr}^2 + T_{s,i}^2) (T_{gr} + T_{s,i}) \quad (7)$$

kde je:

- ε_i emisivita vrstvy i [-],
- σ Stefan-Boltzmannova konstanta, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} [W/m^2K^4]$,
- $F_{o,i}, F_{gr,i}$ úhlový faktor mezi oblohou a vrstvou i , resp. mezi terénem a vrstvou i [-].

Existuje řada korelací pro výpočet ekvivalentní teploty oblohy, pro účely analýzy byla použita rovnice (10), která pro výpočet teploty oblohy $T_o [K]$ používá teplotu okolního vzduchu $T_a [K]$ a teplotu rosného bodu $t_{dp} [^\circ C]$:

$$T_o = T_a \left(0,711 + 0,56 \frac{t_{dp}}{100} + 0,73 \left(\frac{t_{dp}}{100} \right)^2 \right)^{1/4} \quad (10)$$

Vedení vrstvami

Tepelná propustnost vrstvy je dána vztahem:

$$\Lambda_i = \frac{\lambda_i}{\delta_i} \quad (11)$$

kde je:

- λ_i tepelná vodivost vrstvy $i [W/mK]$,
- δ_i tloušťka vrstvy $i [m]$.

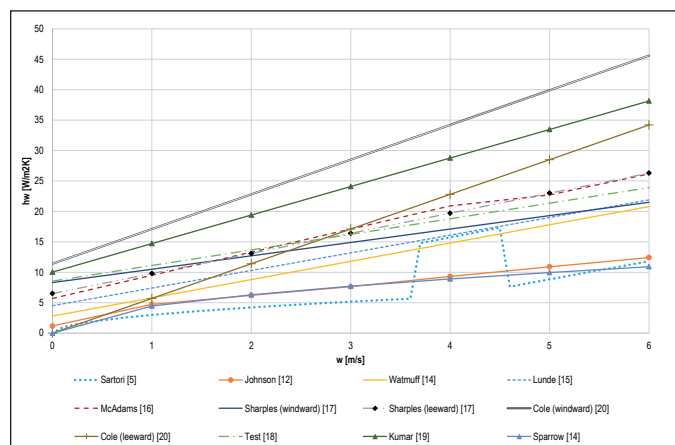
Konvekce vlivem větru z povrchu do okolí

Přestup tepla konvekcí u FV modulu je na jedné straně zásadním členem při zkoumání tepelného chování FV modulu, na druhé straně jeho vyčíslení za reálných podmínek provozu je velice komplexní úloha. V literatuře lze nalézt celou řadu modelů [7], nicméně velká část z nich nakonec zjednodušuje problém do rovnice (12) s koeficienty a a b .

$$h_w = a + b \cdot w \quad (12)$$

kde je:

- w rychlost větru $[m/s]$.



Obr. 2 Modely pro součinitel přestupu tepla konvekcí vlivem větru použité v analýze

Fig. 2 Models for heat transfer coefficient due to wind used in the analysis

Mnoho korelací neuvažuje jen rychlost větru, ale také směr větru a rozlišuje mezi náběžnou plochou a závětrnou plochou modulu. V oblasti solární techniky je potom nejčastěji používána McAdamsova korelace.

Obr. 3 ilustruje, jak se modely pro stanovení součinitele přestupu tepla konvekce vlivem větru navzájem velice liší, často z důvodu odlišných okrajových podmínek stanovení. Při uvažování rychlosti větru 3 m/s vykazuje součinitel přestupu tepla konvekce nejmenší hodnotu na úrovni 5 W/m²K a největší 28 W/m²K, takže se liší více než pětikrát (viz obr. 2). Součinitel přestupu tepla zářením se pohybuje okolo hodnoty 6 W/m²K (s uvažováním emisivity 0,9). Konvekce vlivem větru tak může hrát významnou roli v přenosu tepla FV modulu.

Elektrický model

Elektrický výkon FV modulu je dán elektrickou účinností, která je závislá především na dvou provozních veličinách: teplota FV článků t_{FV} a sluneční ozáření G . Obě závislosti jsou pro vyjádření elektrického výkonu provozní účinnosti FV modulu implementovány v modelu ve formě:

$$q_{el} = \eta_{FV,ref} \left(1 + \gamma (t_{FV} - t_{FV,ref}) \right) \left(1 + k \cdot \ln \frac{G}{G_{ref}} \right) G_{ref} IAM_{eff} \quad (13)$$

kde je:

- $\eta_{FV,ref}$ jmenovitá účinnost FV modulu za normových zkušebních podmínek [-] (referenční teplota článku $t_{FV,ref} = 25^\circ\text{C}$, referenční sluneční ozáření $G_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$),
- γ teplotní součinitel výkonu [1/K],
- IAM_{eff} efektivní modifikátor úhlu dopadu [-], integrující IAM pro přímé, difuzní a odražené sluneční záření.

Pro analýzu byly použity následující parametry polykrystalické technologie FV modulů: $\eta_{FV,ref} = 0,159$, $\gamma = -0,45 \text{ \%}/\text{K}$ a $k = 0,03$.

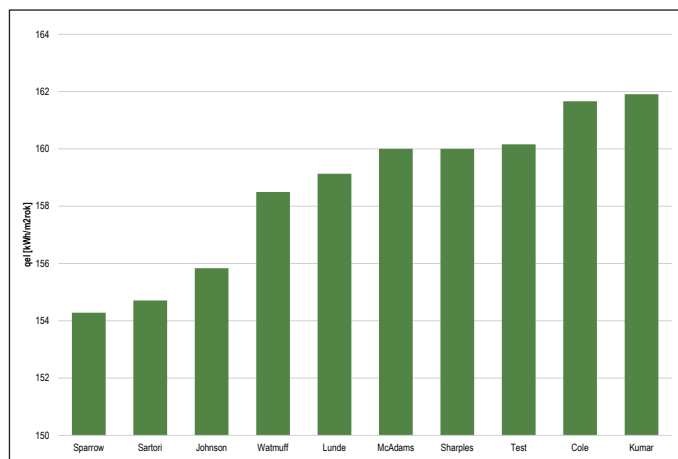
Optický model

Pro zahrnutí optického chování FV modulu byl do modelu integrován i modifikátor úhlu dopadu vyjadřující optickou charakteristiku FV modulu:

$$IAM = 1 - b_0 \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \quad (14)$$

kde je:

- θ úhel dopadu [deg],
- b_0 koeficient [-], $b_0 = 0,05$ pro polykrystalickou technologii.



Obr. 3 Produkce elektrické energie FV modulu stanovená modelem pro různé korelace přestupu tepla konvekce vlivem větru

Fig. 3 Power generation of the PV module determined by the model for various correlations of heat transfer by convection due to wind

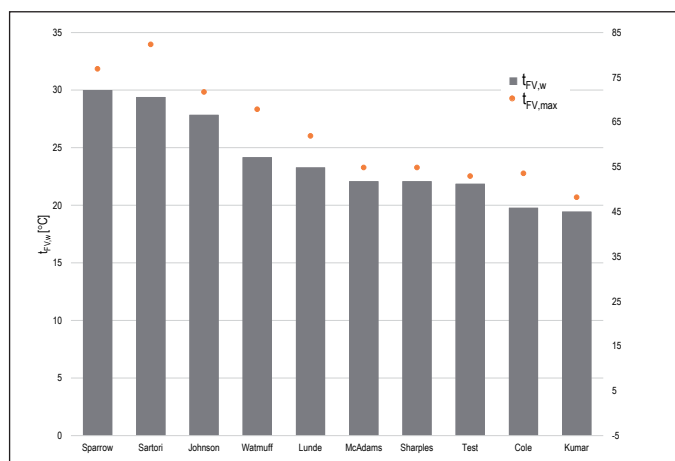
VÝSLEDKY

Výsledky ročních simulací jsou znázorněny na obr. 3. Pro simulace byly použity údaje meteorologické databáze typického roku pro Prahu [11]. Největší produkci elektrické energie vykazuje matematický model při použití korelace podle Kumara a Cola, protože tyto modely vykazují největší hodnoty součinitelů přestupu tepla konvekce. FV modul tak výpočtově pracuje při nejnižších teplotách, a tedy nejvyšší provozní účinnosti. Rozdíl ve vypočítané produkci elektrické energie mezi jednotlivými modely je do 5 %.

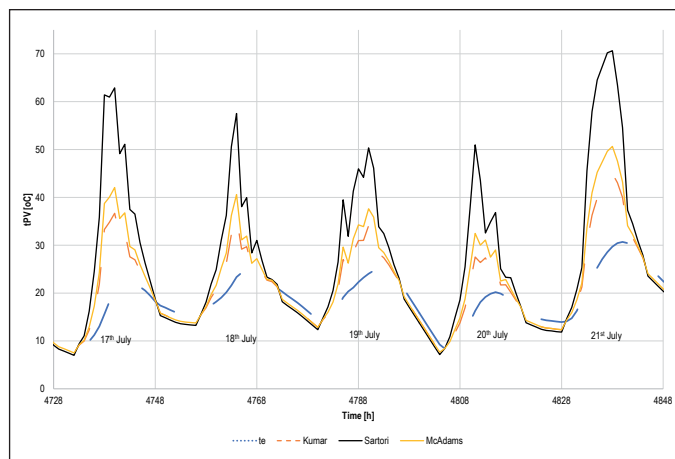
Na základě obr. 3 je možné výsledky rozdělit do tří skupin pro další analýzu: model s nejnižším, středním a nejvyšším součinitelem přestupu tepla konvekce vlivem větru. Uvedené skupiny reprezentují korelace Sartori (nejnižší), McAdams (střední), Kumar (nejvyšší).

Obr. 4 ukazuje, jak se mění teplota modulu u zvolených tří skupin korelací. Rozdíl teplot mezi modely podle Kumara a Sartoriho dosahuje téměř 30 K (21st July). Takový rozdíl teplot vede k téměř 2% absolutnímu rozdílu v účinnosti FV modulu, a tedy k 15% rozdílu v produkci elektrické energie (viz obr. 5).

Obr. 6 ukazuje roční četnost teploty FV článků pro všechny tři modely konvekce vlivem větru. Nejčastější teploty jsou pod 30 °C, pouze několik hodin v roce jsou teploty nad 60 °C.

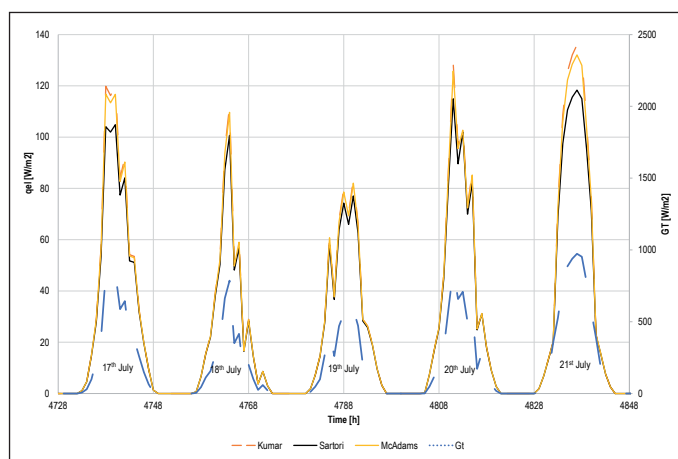


Obr. 4 Teplota FV článků při simulaci s různými modely konvekce vlivem větru
Fig. 4 Temperature of PV cells for simulations with different models of convection due to wind



Obr. 5 Měrný výkon FV modulu v simulaci s různými modely konvekce vlivem větru

Fig. 5 Specific power output of PV module for simulations with different models of convection due to wind



Obr. 6 Roční četnost teplot FV článků v simulaci s různými modely konvekce vlivem větru

Fig. 6 Annual frequency of PV cells temperatures for simulations with different models of convection due to wind

ZÁVĚR

Byl představen model fotovoltaického modulu, na kterém byla provedena analýza vlivu volby modelu přestupu tepla konvekcí vlivem větru na vypočítaný elektrický výkon. Volba modelu může hrát v detailních výpočtech relativně velkou úlohu. Simulace okamžitého elektrického výkonu se může lišit až o 15 %. Na druhé straně vliv volby modelu konvekce na roční produkci FV modulu je potlačen. Rozdíly ve vypočítané produkci elektrické energie jsou do 5 % vzhledem k relativně nízkým provozním teplotám FV modulu. Po většinu roku se teploty FV článků pohybují pod 30 °C.

Kontakt na autora: Yauheni.Kachalouski@fs.cvut.cz

Poděkování: Tento příspěvek vznikl za finanční podpory MŠMT v rámci programu NPU I č. L01605 – Univerzitní centrum energeticky efektivních budov – Fáze udržitelnosti a projektu SGS16/212/OHK2/3T/12 – Modelování, řízení a navrhování zařízení techniky prostředí.

Použité zdroje:

- [1] AKHSASSI, M. et al. Experimental investigation and modeling of the thermal behavior of a solar PV module. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2017. ISSN 0927-0248.
- [2] KING, D. L. et al. 2004. *Photovoltaic Array Performance Model*. SANDIA Report, SAND2004-3535. Sandia National Laboratories, New Mexico.
- [3] SKOPLAKI, E., PALYVOS, J. A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: a review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*. 2009, 83, 614–624.
- [4] BARDHI, M. et al. Comparison of PV Cell Temperature Estimation by Different Thermal Power Exchange Calculation Methods.
- [5] SARTORI, E. 2006. Convection coefficient equations for forced air flow over flat surfaces. *Solar Energy*. 80, 1063–1071.
- [6] KENDOUGH, A. A. Theoretical analysis of heat and mass transfer to fluids flowing across a flat plate. *Int. J. Therm.* 2009, sci. 48, 188–194.
- [7] PALYVOS, J. A. A survey of wind convection coefficient correlations for building envelope energy systems' modeling. *Appl. Therm.* 2008, eng. 28, 801–808.
- [8] KAPLANI, E., KAPLANIS, S. Thermal modelling and experimental assessment of the dependence of PV module temperature on wind velocity and direction, module orientation and inclination. *Solar Energy*. 2014, Volume 107, Pages 443–460. ISSN 0038-092X.
- [9] ARMSTRONG, S., HURLEY, W. G. A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions. *Applied Thermal Engineering*. 2010, Volume 30, Issues 11–12, Pages 1488–1495. ISSN 1359-4311.

- [10] BERDAHL, P., MARTIN, M. Emissivity of clear skies. *Sol. Energy*. 1984, 32, 663–664.
- [11] Transient System Simulation Tool – TRNSYS 17.1 [online]. The University of Wisconsin. Madison. Dostupné z: <http://sel.me.wisc.edu/trnsys>
- [12] JOHNSON, R. R., OTHIENO, H. Estimated wind related heat transfer coefficients for flat plate solar collectors.
- [13] SPARROW, E. M., RAMSEY, J. W. Mass, E.A. Effect of finite width on heat transfer and fluid flow about an inclined rectangular plate. *Trans. ASME, J. Heat Transfer*. 1979, 101, 199–204.
- [14] WATMUFF, J. H. et al. Solar and Wind Induced External Coefficients – Solar Collectors. In: *Revue Internationale d'Heliotechnique, 2nd Quarter*. 1977, pp. 56.
- [15] LUNDE, P. J. *Solar Thermal Engineering*. New York: John Wiley and Sons, 1980.
- [16] MCADAMS, W. H. *Heat Transmission, third ed.* New York: McGraw-Hill, 1954.
- [17] SHARPLES, S., CHARLESWORTH, P. S. Full-scale measurements of wind induced convective heat transfer from a roof-mounted flat plate solar collector. *Solar Energy*. 1998, 62 (2), 69–77.
- [18] TEST, F. L., LESSMANN, R. C. An experimental study of heat transfer during forced convection over a rectangular body. *Transactions of ASME – Journal of Heat Transfer*. 1980, Vol. 102, 146–151.
- [19] KUMAR, S. et al. Wind induced heat losses from outer cover of solar collector. *Renewable Energy*. 1997, Vol. 10, No. 4, pp. 613–616.
- [20] COLE, R. J., STURROCK, N. S. The convective heat exchange at the external surface of buildings. *Buildings and Environment*. 1977, 12, 207–214.
- [21] DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes, second ed.* New York: John Wiley & Sons Inc., 1991.

Lindab v ČR investuje, zveřejnil plány na rok 2019

Švédský mezinárodní koncern Lindab International AB, který působí ve 32 zemích včetně České republiky, zveřejnil své ekonomické výsledky za uplynulý rok. Přední světový výrobce a prodejce vzduchotechniky a dalších stavebních komponent z tenkostěnné oceli, lehkých střešních krytin, fasádních a okapových systémů zaznamenal celkový nárůst čistých tržeb v meziročním srovnání o 13 % na zhruba 883,3 mil. EUR (9,326 mld. SEK). Provozní zisk před úroky a zdaněním (EBIT) dosáhl vloni zhruba 51,8 mil. EUR (547 mil. SEK). Na celkové vlně růstu se podílí také Lindab v České republice. Ten pokračuje v investicích ve svém výrobním areálu v Praze-Ružyni a postupně realizuje plán automatizace a robotizace výroby. Plánuje, že v období let 2015–2020 dosáhnou investice k 500 mil. Kč. To je plně v souladu se strategií celého koncernu, který chce investice do automatizace výroby ještě zrychlovat, aby dosáhl vyšší efektivity, kapacity a výnosnosti. Hlavní investice Lindabu v ČR směřují především do robotizace manuálních činností a inovativních projektů automatizace za použití nových technologií. V roce 2018 investoval a zprovoznil několik projektů za více než 65 mil. Kč. Jednalo se především o robotizaci svařování, různých druhů tváření plechu a obsluhy modernizované práškové lakovny.

Zdroj: Tisková zpráva Lindab, s.r.o.

(VZ)

