

Elektrina ze sluneční energie s využitím akumulace do křemičitého písku

Electric energy from solar energy with utilisation of accumulation into siliceous sand

Doc. Ing. Karel BROŽ, CSc.,
ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav
techniky prostředí

Článek dokazuje jednoduchými bilančními výpočty, jak obtížné je získávání elektriny ze sluneční energie termodynamickou cestou i v krajínách s nejdelším a neintenzivnějším osluněním. Je vyhodnocena účinnost využití dopadlé sluneční energie při celodenním (nepřetržitém) provozu sluneční elektrárny, je-li noční potřeba energie ve dne akumulována do křemičitého písku.

Klíčová slova: sluneční energie, soustředující sluneční kolektor, Rankinův cyklus, parní generátor, elektrický generátor, kondenzátor vodních par

Recenzent
prof. Ing. František Drkal, CSc.

The article proves by simple balance calculations how difficult is to gain electric power from solar energy by thermodynamic way even in countries with the longest and most intensive insolation. The evaluation is indicated of the utilisation efficiency of the impinging solar energy under the all-day (uninterrupted) solar power station operation, when the night demand of energy is accumulated into siliceous sand during the day.

Key words: solar energy, concentrating solar collector, Rankin cycle, steam generator, electric generator, water vapour condenser

V roce 2000 vznikl v Technologickém inovačním centru ČVUT v Praze (TIC) nápad, který měl být prakticky využíván v zemích tropického pásma s nedostatkem vody, na jehož vyřešení se očekávala velká dotace z fondů EU: výroba elektriny termodynamickou cestou, při které zdrojem tepla bude sluneční energie na noční provoz akumulovaná do písku. Nápad vznikl u osob nepříliš obeznámených s termodynamikou a reálným stavem solární techniky a byl ještě toho roku přihlášen jako vynález. Někomu by se mohlo zdát, že je to zcela reálné a výhodné. Jako jeden z mála pracovníků ČVUT, zabývajících se dlouhodobě využíváním sluneční energie, jsem byl požádán o posouzení patentovaného zařízení.

Zařízení jsem umístil do země se zeměpisnou šířkou do 35° s dobou přímého slunečního svitu 3000 hodin za rok a celkovým osluněním 2000 kWh/m²r (obr. 1).

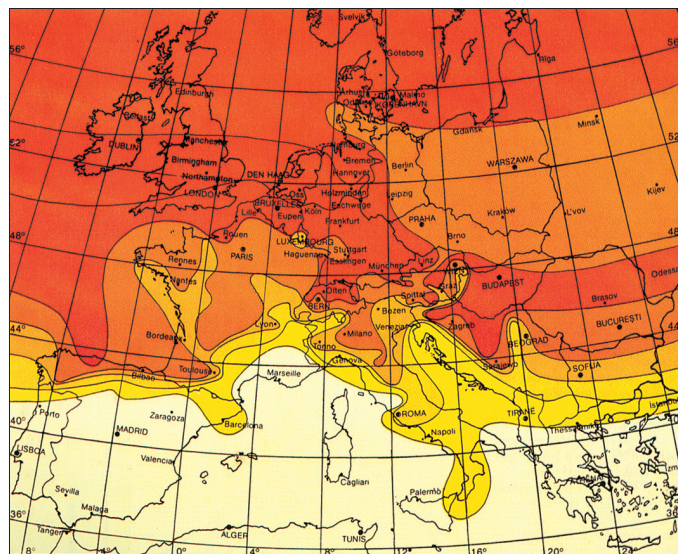
NÁVRH TEPELNÉHO OBĚHU

Porovnávací výpočet jsem měl provést pro malou kondenzační turbínu o elektrickém výkonu 20 kW_e s uzavřeným oběhem a odvodem kondenzačního tepla do vzduchu přes povrchový kondenzátor. Nejvyšší teplota tmavého písku jako teplotonosné látky i akumulační hmoty v primárním okruhu měla být 350 °C. Tepelný oběh jsem řešil směrem od požadovaného výstupu ke vstupu, tj. k požadavkům na primární okruh zásobovaný sluneční energií. Schéma zařízení je na obr. 2.

Teplotu páry v kondenzátoru jsem volil 50 °C vzhledem k možným vysokým teplotám vzduchu ve dne. Tomu odpovídá absolutní tlak v kondenzátoru 12 kPa. Pro páru na vstupu do turbíny jsem volil teplotu 300 °C a tlak 1,5 MPa (stav 1 v obr. 3) vzhledem k tepelným ztrátám z písku o počáteční teplotě 350 °C a k potřebnému konečnému rozdílu teplot ve „speciálním pískovém generátoru páry“, který byl rovněž předmětem patentu.

Další hodnoty již odpovídají obvyklému Rankinovu cyklu:

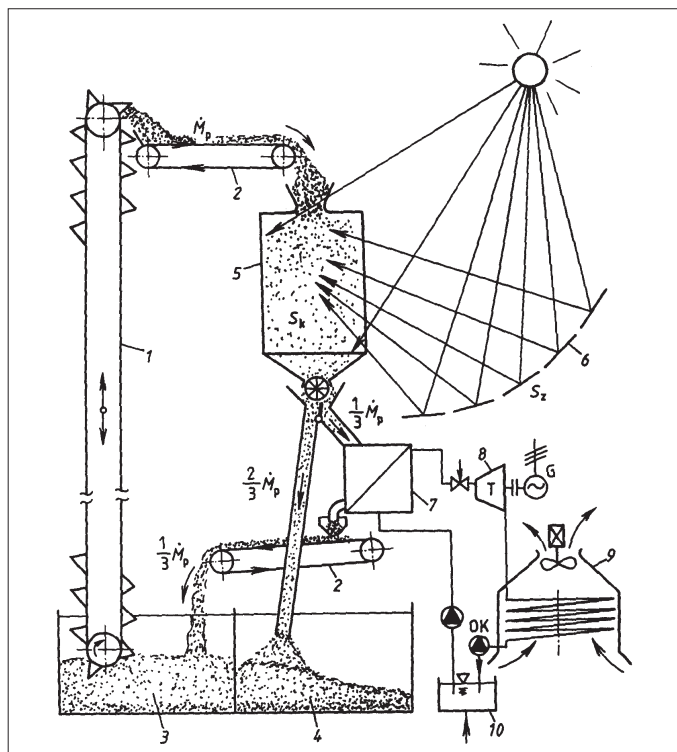
- entalpie vstupní páry do turbíny: $h_1 = 3045$ kJ/kg,
- entalpie páry na výstupu z turbíny při bezztrátové expansi:
 $h_{2ad} = 2215$ kJ/kg,



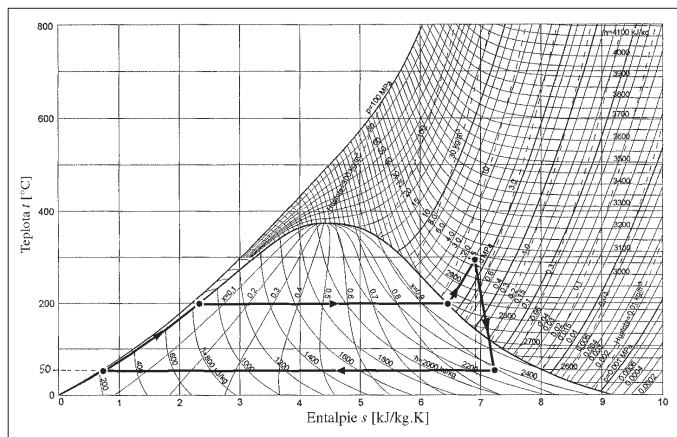
Obr. 1 – Oslunění Evropy a severní Afriky (nad 36°s. š.)

Solární klimatická zóna	Trvání slunečního svitu [h/r]	Celkové ozáření vodorovné plochy cca [kWh/m ² r]
I	< 1500	920
II	1500 až 1700	1030
III	1700 až 1900	1150
IV	1900 až 2100	1230
V	2100 až 2300	1370
VI	2300 až 2500	1490
VII	>2500	1610

- adiabatický spád: $h_{ad} = h_1 - h_{2ad} = 830$ kJ/kg,
- termodynamická účinnost vztážená na výkon na spojce: $\eta_{tdsp} = 0,85$,
- skutečný spád využitý ke konání práce: $h_{sk} = h_{ad} \cdot \eta_{tdsp} = 705,5$ kJ/kg,
- skutečná entalpie páry na výstupu z turbíny: $h_2 = h_1 - h_{sk} = 2339,5$ kJ/kg.



Obr. 2 – Schéma navrhovaného zařízení – funkce ve dne (podle [3])
 1 – korečkový dopravník, 2 – pásový dopravník, 3 – zásobník „studeného“ písku, 4 – zásobník horkého písku, 5 – plochý kolektor na ohřev písku, 6 – natáčivá zrcadla, 7 – pískový generátor páry (předmět patentu), 8 – parní turbina s generátorem, 9 – vzduchem chlazený kondenzátor, 10 – zásobní nádrž napájecí vody



Obr. 3 – Tepelný oběh zařízení v diagramu t – s

Potřebný průtok páry turbinou: $M_p = P : h_{sk} = 0,284 \text{ kg/s}$.

Entalpie kondenzátu o teplotě 50 °C: $h_k = 209,3 \text{ kJ/kg}$.

Množství tepla odváděného z kondenzátoru: $Q_k = M_p \cdot (h_2 - h_k) = 605 \text{ kW}$.

Celkový výkon, který musí dodávat ohřátý písek do generátoru páry:
 $P_p = P + Q_k = 625 \text{ kW}$
 (v této hodnotě nejsou započteny ztráty při dopravě a akumulaci).

Pro úsporu vody byl navržen vzduchem chlazený žebrovaný kondenzátor s nuceným prouděním vzduchu. Ventilátor spotřebuje část vyrobené elektrické energie. Příkonem ventilátoru jsem se v prvním přiblížení nezabýval.

Potřebný průtok vzduchu kondenzátorem při jeho předpokládaném ohřátí o 10 K (z teploty 38 °C na 48 °C):

$$M_v = Q_k : (c \cdot \Delta t) = 605 : (1,01 \cdot 10) = 59,9 \text{ kg/s (přibližně } 50 \text{ m}^3/\text{s)}$$

Odhadovaná potřebná teplosměnná plocha na straně vzduchu: $S = 600 \text{ m}^2$.

Z předchozího vyplývá, že již při tlakové ztrátě 0,3 kPa proudí vzduchu v kondenzátoru by ventilátor spotřeboval celou výrobu elektřiny. Druhým řešením by byl odvod tepla z kondenzátoru chladicí věží, ale v tom případě by byl odpar 0,25 kg/s, tj. 21,8 m³ vody za den. Protože cílem bylo použít sluneční elektrárnu v místě s nedostatkem vody, toto řešení by prakticky rovněž nepřicházelo v úvahu.

NÁVRH SOLÁRNÍ ČÁSTI SYSTÉMU

Základní představa autorů byla, že písek bude ohříván v plochém kolektoru (nebo v sestavě plochých kolektorů – viz obr. 2), do kterého bude ze zásobníku dopravován korečkovým výtahem. Na výstupu z násypky měly být usměrňovací plechy, které písek rozdělí do tenké vrstvy v kolektoru. Další doprava písku jak do generátoru páry, tak do zásobníků, se měla dít jen vlivem gravitace. K dosažení výstupní teploty 350 °C je nutné sluneční záření koncentrovat, podle vykonaných experimentů zhruba 10 x. Koncentrovat lze jen přímou složku slunečního záření, difusní složka zůstává rozptýlena. Poměr přímé a difusní složky závisí nejvíce na obsahu vodních par ve vzduchu. Například v ČR je podíl obou složek na celkovém ročním množství sluneční energie zhruba stejný. V krajinách, pro které se tento zdroj navrhoval, bylo uvažováno s podílem difusního záření v jasných dnech 10 %.

Průměrná doba přímého slunečního záření za den: $3000 : 365 = 8,2 \text{ h/den}$.

Průměrná intenzita slunečního záření: $I_p = 2000 : 3000 = 0,667 \text{ kW/m}^2$.

Z toho činí 90 % přímé záření: $I_{pp} = 0,667 \cdot 0,9 = 0,601 \text{ kW/m}^2$.

Při stanovení potřebné plochy zrcadel a absorberu kolektoru je nutno vyjít z požadavku, že musí být kryta potřeba energie na období bez slunečního svitu (večer, noc), ztráty při odrazu na zrcadlech, optické a tepelné ztráty kolektoru, tepelné ztráty při dopravě a akumulaci písku.

Součinitel odrazivosti zrcadla $r = 0,95$.

Součinitel propustnosti krycího skla kolektoru $\tau = 0,95$.

Součinitel pohltivosti tmavého písku (neselektivní materiál) $a = 0,95$.

Tepelné ztráty kolektoru: $Q_{zk} = S_k \cdot (t_p - t_v) \cdot (k_p + k_z) \text{ [W]}$
 kde

t_p – je střední teplota písku v kolektoru (207,5 °C) při ohřevu ze 65 na 350 °C,

t_v – teplota vzduchu při slunečním svitu (38 °C),

k_p – součinitel prostupu tepla přední stranou kolektoru (9,5 W/m²K),

k_z – součinitel prostupu tepla zadní stranou kolektoru (0,4 W/m²K),

S_k – apertura kolektoru (= ploše absorberu) (m²).

Vztah plochy zrcadel a apertury kolektoru: pro požadovanou 10 násobnou koncentraci přímého záření bude apertura tvořit 10 % plochy zrcadel: $S_k = 0,1 \cdot S_z$.

Plocha zrcadel musí dle požadavku zaručit přísun energie na 24 hodin chodu denně, zatímco využitelná doba slunečního záření je průměrně 8 hodin denně. Z toho vyplývá, že plocha zrcadel, apertura kolektoru i průtok písku musí být 3 x větší než by odpovídalo provozu bez akumulace. Akumulátor písku musí být rozdělený na 2 části. Jedna třetina průtoku ohřátého písku jde v denní době přímo do generátoru páry a ochlazená se vrací do vybité části akumulátoru. Dvě třetiny průtoku ohřátého písku jdou v denní době do nabíjené části, odkud se ve večerní a noční době odebírají a ochlazené se tam opět vrací.

Energetické ztráty zrcadel a kolektorů se projevují jen v době slunečního svitu, ztráty při dopravě a akumulaci působí celodenně.

Tepelné vlastnosti křemičitého písku nejsou v dostupných pramenech jednotně stanoveny. Například [1] uvádí tyto hodnoty:

hustota $\rho = 1750 \text{ kg/m}^3$,
 součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,095 \text{ W/m K}$,
 měrná tepelná kapacita $c = 0,96 \text{ kJ/kg K}$;

zatímco podle [2] je:

$\rho = 1500 \text{ kg/m}^3$,
 $\lambda = 0,3 \text{ W/m K}$,
 $c = 0,8 \text{ kJ/kg K}$ (starší údaje).

Údaje podle [1] jsou novější a zároveň pro výpočet příznivější, takže jsou v dalším použity.

Kolektor musí předávat do písku celkový výkon $Q_k = 3 \cdot 625 \text{ kW} = 1875 \text{ kW}$.
 Tomu odpovídá průtok písku kolektorem: $M_{pis} = Q_k / (c \cdot \Delta t) = 1875 / (0,96 \cdot (350 - 65)) = 6,853 \text{ kg/s} = 24\,700 \text{ kg/h}$, což odpovídá 202 300 kg písku za 8,2 hodiny průměrného chodu za den. To dále představuje celkový objem 116 m^3 písku proběhlého zařazením za den. Objem vybité části by byl 38 m^3 , objem ve dne nabíjené části 78 m^3 .

Po dosažení vpředu uvedených známých hodnot budou tepelné ztráty kolektorů:
 $Q_{zk} = S_k \cdot (t_p - t_v) \cdot (k_p + k_z) = S_k \cdot 9,9 \cdot (207,5 - 38) = S_k \cdot 1678$ [W]

Optické ztráty kolektorů (energie ztracená před a při dopadu na absorber):
 $Q_{optk} = S_k \cdot (1 - \tau \cdot a) \cdot I_{pk}$ [W]

kde

I_{pk} je intenzita záření dopadající na kolektor, tedy koncentrovaná. V tomto případě $I_{pk} = 10 \cdot I_p = 6010 \text{ W/m}^2$

$Q_{optk} = S_k \cdot (1 - 0,95^2) \cdot 6010 = S_k \cdot 586$ [W]

Celkové ztráty kolektorů: $Q_{zck} = Q_{zk} + Q_{optk} = 2264 \cdot S_k$ [W]

Energie dodávaná zrcadly musí být o ztráty kolektorů vyšší než je jejich žádaný výkon:

$Q_{cz} = Q_k + Q_{zck} = 1875 + 2,264 \cdot S_k$ [kW]

Příkon přímého slunečního záření, dopadajícího na zrcadla, musí být ještě větší o ztráty při nedokonalém odrazu:

$Q_{pz} = Q_{cz} \cdot r = (1875 + 2,264 S_k) \cdot 0,95 = 1974 + 2,383 S_k$ [kW]

Zároveň platí: $Q_{pz} = S_z \cdot I_{ps} = S_z \cdot 0,601$ [kW]

Z obou posledních rovnic určíme dosažením za $S_k = 0,1 S_z$ nebo naopak:
 $S_z = 5442 \text{ m}^2$ – plocha zrcadel nebo plocha kolektorů $S_k = 544 \text{ m}^2$.

ZÁVĚR

Myšlenka nepřerušované výroby elektrické energie s využitím akumulace sluneční energie do písku v krajinách s nejdelší dobou slunečního svitu a nedostatkem vody je na první pohled možná lákavá. Při rámcové bilanční analýze se však prokázalo, že rozměry zařízení by byly neúnosně velké a konečné využití sluneční energie velmi nízké, případně by zařízení vůbec nebylo schopno samostatného provozu. Pro elektrický výkon generátoru 20 kW_e, z něhož by podstatnou část tvořila ještě vlastní spotřeba pro dopravu písku a ventilátor kondenzátoru, by bylo nutno instalovat:

- 5542 m² natáčivých koncentrujících zrcadel,
- 554 m² kolektorů protékajících pískem,

- akumulátor písku dělený, s celkovým objemem nejméně 116 m³,
- transportní mechanizmy na písek, regulovatelné a pohyblivé,
- vzduchový kondenzátor s plochou 600 m², průtok vzduchu 50 m³/s,
- generátor páry: písek 350 °C – vodní pára 1,5 MPa, 300 °C.

Pro tato zařízení ani nebyly odhadnuty investiční náklady, protože je zřejmé, že by tento princip nebyl schopný soutěžit s dalšími možnostmi. Očekávaná denní výroba elektřiny by byla 480 kWh, zatímco na zrcadla by za den dopadlo průměrně 27 312 kWh sluneční energie. Její výsledné využití by tedy bylo:

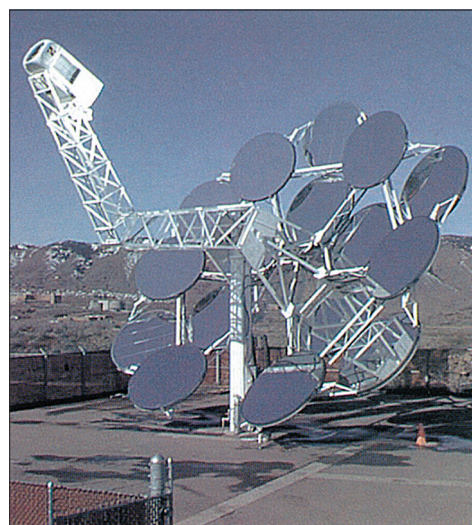
$$\eta_{el} = 480 : 27\,312 = 0,0176 = 1,76 \%$$

Pro srovnání je na obr. 4 uvedena část sluneční elektrárny s koncentrujícími zrcadly (poměr koncentrace přímého záření 40 : 1), pracující také s Rankinovým cyklem a vyrábějící v absorbérech přímo vysokotlakou páru. Elektrárna je v chodu jen při slunečním záření (bez akumulace), ale využití energie slunečního záření je již okolo 30 %, tedy mnohokrát vyšší než ve vpředu řešeném případě.

Další možností pro země s velkým podílem slunečního záření a nedostatkem vody představují solární zařízení se Stirlingovým motorem, kde voda a vodní pára vůbec není zapotřebí (obr. 5). Stirlingův motor má uzavřený vnitřní tepelný oběh s vnějším přívodem a odvodem tepla. U řešení na obr. 5 zajišťují vnější přívod tepla solární heliostaty o ploše 100 m², v jejichž ohnisku je Stirlingův motor s generátorem o elektrickém výkonu 25 kW_e. Účinnost výroby elektřiny za optimálních podmínek slunečního záření je 38 %.



Obr. 4 – Zdrojová část sluneční elektrárny, pracující bez akumulace energie (podle [4])



Obr. 5 – Stirlingův motor s generátorem 25 kW a s heliostaty o ploše 100 m² (podle [5])

Použité zdroje:

- [1] ČSN 73 0540.
- [2] CIHELKA, J.: *Sálavé vytápění*. SNTL Praha, 1961.
- [3] BROŽ, K.: *Výroba elektřiny ze sluneční energie termodynamickou cestou s využitím akumulace tepla do písku*. Nepublikovaná studie. ČVUT v Praze, Fakulta strojí, Ústav techniky prostředí. Praha, květen 2001.
- [4] Sun World No.4, Volume 16. Časopis International Solar Energy Society, December 1992.
- [5] BROŽ, K., ŠOUREK, B.: *Alternativní zdroje energie*. Vydavatelství ČVUT, Praha 2003. ISBN 80-01-02802-X.