

Ing. Štěpán NOSEK  
 ČVUT v Praze, Fakulta strojní,  
 Ústav techniky prostředí

# Mikrokogenerační jednotka s hybridním Stirlingovým solárním motorem



Ústav techniky prostředí

## Micro Cogeneration Unit with Hybrid Stirling Solar Engine

Recenzent  
 prof. Ing. Karel Hemzal, CSc.

Článek pojednává o simulaci nového konceptu mikrokogenerační jednotky. Jde o systém produkující elektrickou energii z koncentrovaného záření Stirlingovým solárním motorem (SSE) a odpadní teplo, které je možno využít pro vytápění a přípravu teplé vody v rodinném domě. Je prezentován jak model celkového systému vytvořeného v programovém prostředí MATLAB®, tak i výsledky jeho simulace.

**Klíčová slova:** Stirlingův solární motor, mikrokogenerační jednotka

The article deals with a simulation of a new concept of a micro cogeneration unit. This system produces electricity from concentrated solar radiation using Stirling solar engine (SSE) and waste heat can be utilized for heating and hot water supply of a family house. The article presents both the model of the whole system created in MATLAB® software environment and its results as well.

**Key words:** Stirling solar engine, micro cogeneration unit

### ÚVOD

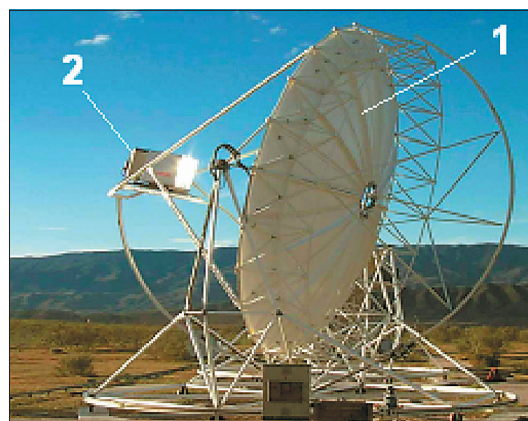
Zvláštním a velmi slibným případem přeměny sluneční energie na mechanickou a následně na elektrickou se v současné době stává solární systém využívající Stirlingův motor (SM), tzv. Stirlingův solární motor (SSM).

Již v roce 1870 využil Ericsson výhody SM jako pístového motoru s vnějším přívodem tepla, vynalezeného r. 1819 R. Stirlingem [1]. Duřným zrcadlem koncentroval Ericsson sluneční záření na hlavu ohřivaného válce (expanzního) SM, ve kterém se nacházel tzv. „přehaněč“ – volný píst, po stranách neutěsněný, sloužící pouze k přemísťování hermeticky uzavřeného pracovního plynu – vzduchu. Působením zkoncentrovaného záření se vzduch ohříval a expandoval do druhého, kompresního válce, ve kterém se předtím nacházel pracovní píst, tentokrát utěsněný, ve své horní úvratí. Kompresní válec byl situován na odvrácené straně, kde ho okolní vzduch ochlazoval přirozenou konvekcí. Po expanzi vzduchu v kompresním válci, která způsobila přemístění pracovního pístu do dolní úvratě a tedy vykonala práci, docházelo k ochlazení vzduchu. Jeho objem se tak smršťoval a vzniklý podtlak nasáhl pracovní píst zpět do horní úvratě. Mezi expanzním a kompresním válcem se nacházel ještě velmi důležitý regenerační tepelný výměník, který plnil funkci úschovy tepelné energie pracovního vzduchu při jeho průchodu z expanzního válce do kompresního a zpět.

Od doby Ericssonova SSM vzniklo mnoho různých pokusů zkonstruovat efektivní SSM, nicméně až začátkem 80. let minulého století začal na podnět ropné krize (70. léta) probíhat v USA projekt pod názvem Dish/Stirling, který vyústil v nejúčinnější technologii pro přeměnu sluneční energie na elektrickou dosahující až 30 % [2].

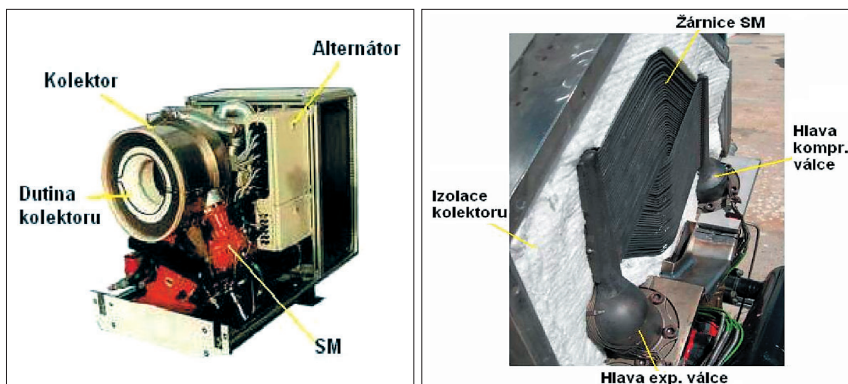
V Evropě vznikl počátkem 90. let, za spolupráce několika států (Francie, Německo, Itálie a Španělska), projekt, zvaný Eurodish [3].

V principu jsou oba projekty podobné, liší se jen provedením jednotlivých komponent. Na obr. 1 je schématicky znázorněn stávající solární systém SSM Euro-

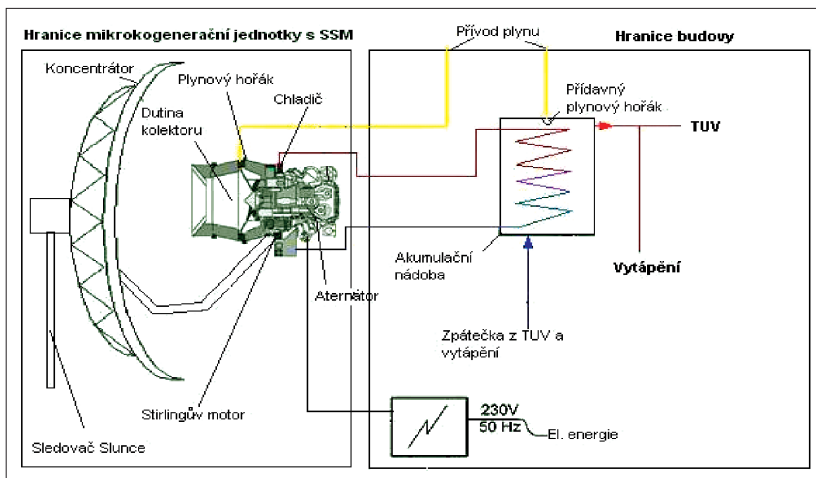


Obr. 1  
 Stávající systém Stirlingova solárního motoru Eurodish (Keck a kolektiv, 2006)

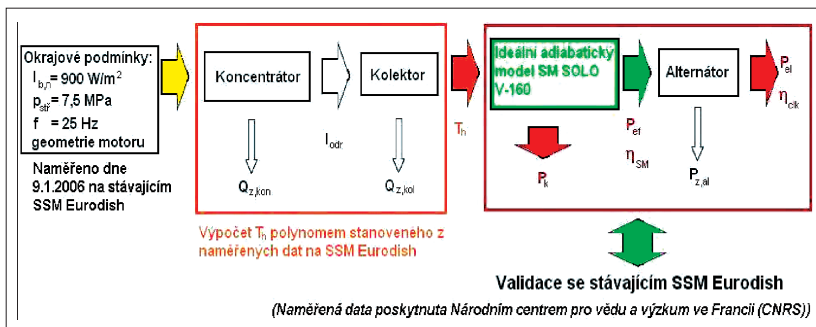
rodish, ve francouzském Odeillu. V ohnisku koncentrátoru (obr. 1, č. 1) se nachází jednotka pro přeměnu sluneční energie na elektrickou (obr. 1, č. 2), skládající se z kolektoru, SM a alternátoru. Kolektor pohlcuje sluneční energii odraženou z koncentrátoru, mění ji na tepelnou, která následně ohřívá hermeticky uzavřený pracovní plyn (vodík nebo helium) ve SM. Absorbující plocha kolektoru je umístěna za ohniskem koncentrátoru za účelem přivést na ni co největší tok koncentrovaného záření. V případě systému Eurodish ji tvoří žárnice (ohřivač) SM, které jsou napojeny na hlavy válců, jak je znázorněno na obr. 2. Aby byly sníženy



Obr. 2 Jednotka pro přeměnu sluneční energie na elektrickou (vlevo) a řez zadní stranou kolektoru, kde se nacházejí žárnice SM (vpravo) (Keck a kolektiv, 2006)



Obr. 3 Zjednodušené schéma zapojení mikrokogenerační jednotky se SSM k budově



Obr. 4 Schéma výpočtového modelu mikrokogenerační jednotky s hybridním SM a jeho validace s naměřenými hodnotami na stávajícím SSM Eurodish

ztráty radiací a konvekcí, je ohnisko soustředěno do dutiny, jejíž stěny jsou z vysoce odrazivého materiálu a zaizolovány keramickou izolací. Ve SM je pak na základě jeho výše zmíněného oběhu konána práce pracovním pístem, který roztáčí klikovou hřídel a s ní spojenou hřídel alternátoru. Hlavní podmínkou provozu je schopnost parabolického koncentrátoru přesně sledovat slunce ve dvou osách (azimutově-elevační sledování slunce) za účelem dosažení požadovaných teplot v kolektoru, tedy v ohřivači SM.

Mezi výhody tohoto solárního systému patří modularita, která jej dovolu- je samostatně rozmístit pro vzdálené aplikace, nebo seskupovat dohromady do malých sítí. Dále již zmíněná vysoká účinnost přeměny sluneč- ní energie na elektrickou, nízká hlučnost (nedochází k žádným výbu- chům jako u zážehových, či vznětových motorů) a především mož- nost využití jakéhokoliv dalšího vnějšího zdroje tepla.

V oblasti energetiky dosáhl již svá první uplatnění, a např. v USA byl učiněn první krok k jeho komercializaci: do roku 2012 je plá- nována výstavba 20 000 jednotek o celkovém instalovaném el. výkonu 500 MW<sub>e</sub> (el. výkon jedné jednotky 25 kW<sub>e</sub>) [4]. K tomu na- pomohly nejen optimální podmínky pro solární energetiku (oblast Mohavské pouště ve státě Kalifornie), ale i podmínky ekonomické dostupnosti energetických zdrojů. V Evropě stále probíhá výzkum výše zmíněného systému Eurodish (o el. výkon 10 kW<sub>e</sub>) za úče- lem navýšit jeho celkovou účinnost přeměny sluneční energie na elektrickou, která doposud dosáhla „pouze“ 22 % při jmenovitém elektrickém výkonu [3].

Jelikož SSM je tepelným motorem, naskytá se i otázka jeho využití jako mikrokogenerační jednotky (MJ), která zatím nebyla zkoumána. SSM by tak mohl být efektivně provozován i ve vyšších zeměpisných šířkách, kde se nachází i ČR.

V rámci disertační práce autora článku byl navrhnout a si- mulován v programovém prostředí MATLAB nový kon- cept MJ využívající stávající SSM Eurodish, s přídavným zdrojem tepla (integrováním plynovým hořákem do ko- lektoru SSM) – tzv. MJ s hybridním SSM (obr. 3) [5]. Si- mulace si kladla za cíl určit ušetřené množství energie v tzv. solárním režimu provozu (je v provozu pouze bě- hem přítomnosti přímého slunečního záření), které by bylo zapotřebí při konvenčním způsobu výroby elektric- ké a tepelné energie ve zvolené lokalitě ČR.

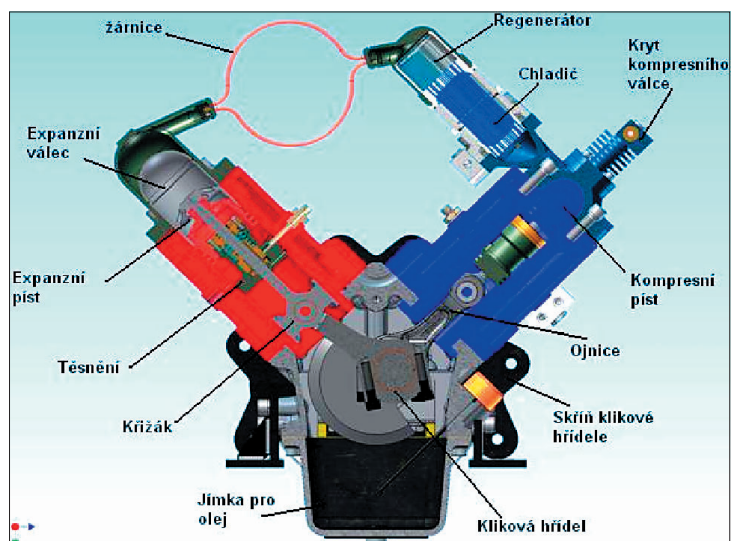
S ohledem na možný rozsah článku je prezentován model a metoda řešení nového konceptu MJ se SSM bez hybrid- ního režimu provozu a uvedeny výsledky její simulace pro Prahu.

### CELKOVÝ MODEL MIKROKOGENERAČNÍ JEDNOTKY

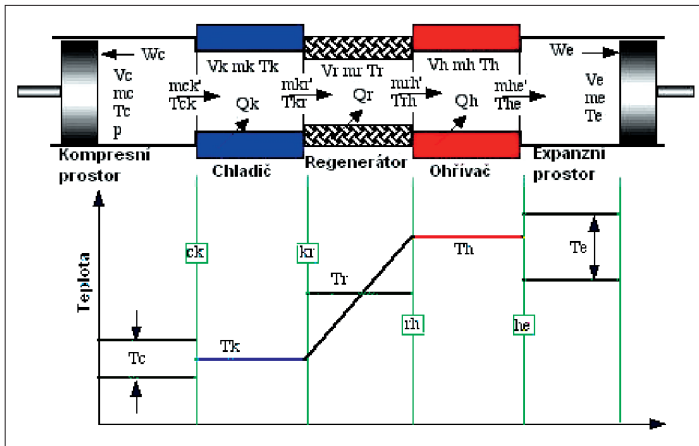
Na obr. 4 je znázorněno schéma výpočtového modelu. Pro jeho validaci byla hlavní vstupní hodnotou intenzita přímého slunečního záření  $I_{b,n}$  naměřená na stávajícím SSM Eurodish ve francouzském Odeillu (dne 9. 1. 2006;  $I_{b,n} = 900 \text{ W.m}^{-2}$ ). Dále byla na základě naměřených hod- not  $I_{b,n}$  a střední teploty žárnic (ohřivače) SM  $T_h$ , umístě- ných v absorberu kolektoru stanovena polynomičká funkce pro výpočet  $T_h$  v závislosti na  $I_{b,n}$ . Teplota  $T_h$  je pak vstupní proměnou pro ideální adiabatický model (IAM) SM, jehož okrajové podmínky jsou provozní frek- vence  $f$ , střední hodnota tlaku  $p_{stf}$  a geometrie kompo- nentů (pracovních válců a výměníků tepla) stávajícího

SM SOLO V-160. Pro validaci IAM byly porovnány naměřené provozní parametry stávajícího SSM Eurodish v Odeillu (elektrický a tepelný vý- kon při  $I_{b,n} = 900 \text{ W.m}^{-2}$ ) s provozními parametry získanými z počítačové simulace.

Po úspěšné validaci se hlavní vstupní hodnotou stal vektor  $I = [I_{b,n,i}]$ , vyge- nerovaný pro danou lokalitu ČR a každou hodinu referenčního roku v si- mulačním programu TRNSYS (vektor  $I$  je sloupcovým vektorem, kde kaž- dý řádek představuje hodnotu  $I_{b,n,i}$  v danou  $i$ -tou hodinu referenčního roku (řazeno chronologicky – vektor  $I$  obsahuje 8671 hodnot  $I_{b,n,i}$ ) a zvolenou teplotu chladiče SM, která je pro zjednodušení uvažována konstantní  $T_k = 313 \text{ K}$ . Bylo tak možné kvazistacionárně vypočítat provozní parametry MJ s HSSM pro každou hodinu referenčního roku v případě solárního režimu



Obr. 5 Konstrukce tzv. alfa modifikace SM dle společnosti Tedom – holding s.r.o.



Obr. 6 Schéma adiabatického modelu SM, s průběhem teplot v jeho jednotlivých částech

provozu: tepelný a elektrický výkon  $P_{\text{tep}}$ , resp.  $P_{\text{el}}$ , a množství vyrobené tepelné a elektrické energie  $Q_{\text{tep}}$ , resp.  $Q_{\text{el}}$ .

### Tepelná energie ze slunce – model koncentrátoru a kolektoru

Množství energie předané SM koncentrátozem a kolektorem je závislé na mnoha veličinách: na  $I_{b,n}$ , účinné ploše koncentrátoru  $S_{\text{kon}}$ , jeho odrazivosti  $\rho_{\text{kon}}$  a především na účinnosti kolektoru, která je závislá na své konstrukci (propustnost vstupní štěrby do koncentrátoru  $\tau$  a součinitelem pohltivosti absorberu  $a$ ) a tepelných ztrátách, vzniklých konvekcí, vedením a zářením [2]. Jelikož by výpočet střední teploty ohřivače SM  $T_h$  vyžadoval vyvinutí speciálního výpočtového modelu zahrnujícího termodynamickou analýzu kolektoru, byla získána závislost  $T_h$  na  $I_{b,n}$  interpolací z naměřených dat na stávajícím SSM Eurodish (4 hodnoty  $I_{b,n}$  a jim odpovídající teplota  $T_h$ ) polynomem 3. stupně.

### Model Stirlingova motoru (SM)

Pro simulaci SM SOLO V-160 byl použit tzv. ideální adiabatický model dle Urieliho [6] (obr. 6). Jedná se o tzv. analýzu 2. řádu založenou na Schmidově analýze a zahrnující navíc výpočet tepelných a třecích ztrát při proudění pracovního plynu jednotlivými částmi SM [7]. Podle tohoto modelu je SM rozdělen na pět samostatných částí, řazených následovně za sebou: kompresní prostor (c), chladič (k), regenerátor (r), ohřivač (h) a expanzní prostor (e). Každá část je uvažována jako samotný prostor, ve kterém má pracovní plyn svou okamžitou hmotnost  $m$ , absolutní teplotu  $T$ , objem  $V$  a tlak  $p$ . Kompresní a expanzní prostor je adiabatický, takže nedochází k přestupu tepla do/z okolí. K přenosu tepla dochází pouze v chladiči a ohřivači. Dolní jednoduché indexy (c, k, r, h, e) označují pět komor, dvojité (ck, kr, rh, he) pak jejich rozhraní.

Entalpie je přenášena přes jednotlivá rozhraní na základě hmotnostního toku  $\dot{m}$  (vyznačeného na obr. 6 šipkami) a teplotního gradientu. Z diagramu rozložení teplot podél všech komor je vidět, že model neuvazuje teplotu v kompresním a expanzním prostoru konstantní a že se mění po dobu jednoho cyklu dle adiabatické komprese či expanze. Z tohoto důvodu směr proudění entalpie, například přes rozhraní mezi kompresním prostorem a chladičem, značené indexem ck, určuje rovnost teplot v rozhraní se sousední komorou.

Teploty v místě rozhraní mezi kompresním prostorem a chladičem  $T_{ck}$ , a ohřivačem a expanzním prostorem  $T_{he}$ , byly podle obr. 6 následovně algoritmičticky odvozeny (šipky v obrázku znázorňují kladný směr proudění)

$$\text{pokud } \dot{m}_{ck} > 0 \text{ pak } T_{ck} = T_c, \text{ jinak } T_{ck} = T_k, \quad (1)$$

$$\text{pokud } \dot{m}_{he} > 0 \text{ pak } T_{he} = T_h, \text{ jinak } T_{he} = T_e. \quad (2)$$

Rovnice tepelných toků ve výměnících jsou odvozeny z energetické rovnice, kde je předpokládáno, že  $dW=0$ ,  $T = \text{konst.}$  (neboť tepelný výměník je uvažován jako samostatný prostor s konstantní teplotou), do kterých je dosaženo za změnu hmotnosti pracovního plynu ze stavové rovnice ( $dm = dpV/rT$ ).

Např. pro tok tepla v chladiči platí

$$dQ_k = \frac{V_k c_k dp}{r} - c_p (T_{ck} \dot{m}_{ck} - T_{kr} \dot{m}_{kr}), \quad (3)$$

kde označení  $d$  představuje derivaci příslušné veličiny podle úhlu natočení klikové hřídele  $\theta$ .

### Výpočet tepelných ztrát ve výměnících

Aby model SM motoru se co nejvíce podobal skutečnému, byly stanoveny tepelné a tlakové ztráty v ohřivači, chladiči a regenerátoru.

V případě neideálního ohřivače, jakým je trubkový ohřivač ve SM SOLO V-160 je střední teplota pracovního plynu v ohřivaném prostoru  $T_{g,h}$  nižší než teplota vnitřní stěny ohřivače  $T_{w,h}$ , [6]:

$$T_{g,h} = T_{w,h} - \frac{Q_{h,f}}{\alpha_{wk,h} A_{wg,h}}, \quad (4)$$

kde  $Q_{h,f}$  je přenesené teplo za jeden cyklus z ohřivače pracovnímu plynu získané z integrace rovnice (3),  $\alpha_{wk,h}$  je součinitel přestupu tepla konvekcí na vnitřní stěně ohřivače,  $A_{wg,h}$  je celková vnitřní teplosměnná plocha ohřivače a  $f$  je provozní frekvence motoru. Jelikož proudění pracovního plynu (vodíku) uvnitř trubek ohřivače je turbulentní, je  $\alpha_{wk,h}$  vypočteno na základě Reynoldsovy analogie [8]. Podobný výpočet je proveden pro chladič, avšak se záporným tepelným tokem  $Q_{k,f}$ .

Ve SM SOLO V-160 regenerátor představuje akumulaci hmotu z drátěného síťoví (o průměru drátu pouze 0,1 mm) napěchovaného v destičkách do dutého válce, který tvoří plášť regenerátoru. Při délce pouhých 30 mm udržuje tento druh tepelného výměníku teplotní rozdíl na obou koncích přibližně 600 K, odpovídající teplotnímu gradientu  $\delta T/\delta x = 20\,000$  K/m. V případě regenerátoru by byl model velmi náročný, a tak je jeho výpočet založen na experimentálních studiích [8, 9].

Tepelné ztráty regenerátoru jsou stanoveny z jeho účinnosti. Ta je odvozena na základě uvažovaného lineárního teplotního profilu v regenerátoru, změny entalpie a sdílení tepla při proudění plynu regenerátorem:

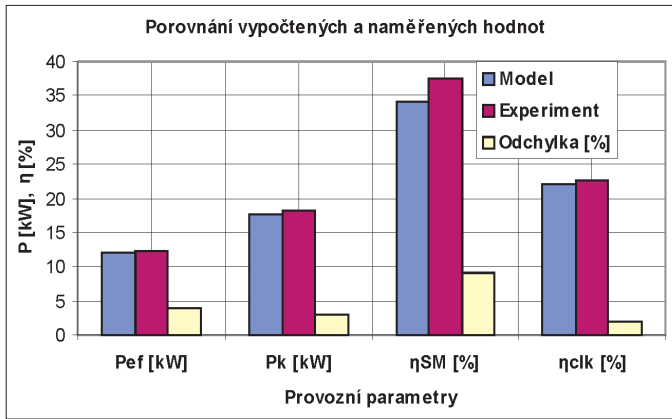
$$\eta_r = \frac{1}{\left(1 + \frac{c_p \dot{m}}{\alpha_{ck} A_{wg,r}}\right)}. \quad (5)$$

Druhý sčítanec ve jmenovateli  $c_p \cdot \dot{m}/(\alpha_{ck} \cdot A_{wg})$  je převrácená hodnota známé teplotní charakteristiky výměníku označované jako NTU (Number of Transfer Units), kterou lze vyjádřit Stantonovým číslem:

$$NTU = St \frac{A_{wg}}{2A}, \quad (6)$$

kde  $A$  je průřez proudy plynu proudícího přes akumulaci hmotu regenerátoru a  $St$  Stantonovo číslo, charakterizující poměr intenzity sdílení tepla a tepelné kapacity proudy plynu ( $St = \alpha/(\rho u c_p)$ ). Z mnoha studií o tepelných výměnících je možno získat empirické hodnoty Stantonova čísla pro určitý typ tepelného výměníku.

Pro regenerátor byl použit z publikace [9] následující vztah



Obr. 7 Porovnání vypočtených a naměřených hodnot hlavních provozních parametrů SSM

$$St = \frac{0,46 Re^{-0,4}}{Pr} \quad (7)$$

V intervalu provozních teplot je Prandtlovo číslo konstantní (Pr = 0,7).

Součtem tepelné ztráty regenerátoru, dané jeho účinností, a tepelné ztráty pláštěm regenerátoru v podélném směru  $\dot{Q}_{ztr,pl}$  je vypočtena celková tepelná ztráta regenerátoru:

$$\dot{Q}_{ztr,r} = \dot{Q}_{ztr,e} + \dot{Q}_{ztr,pl} = \left[ (1 - \eta_r) (q_{r,max} - q_{r,min}) \right] f + \left[ \frac{\lambda_{w,r} A_{w,r}}{l_r} (T_{w,h} - T_{w,k}) \right] \quad (8)$$

kde  $q_{r,max}$ , resp.  $q_{r,min}$ , je maximální, resp. minimální množství tepla předané regenerátorem v daném cyklu,  $\lambda_{w,r}$  součinitel tepelné vodivosti pláště regenerátoru,  $A_{w,r}$  čelní plocha pláště regenerátoru a  $l_r$  jeho délka.

### Výpočet tlakových ztrát v tepelných výměnících

Navyšování účinnosti má za následek navýšení tlakových ztrát (větší, složitější teplosměnné plochy). Dochází tak ke snížení vykonané práce SM o práci vynaloženou na překonání vnitřních třecích sil způsobených vazkostí pracovního plynu.

$$W = \int_0^{2\pi} p (dV_e + dV_c) - \int_0^{2\pi} \sum_{i=1}^3 \Delta p_i dV_c = W_i - \Delta W, \quad (9)$$

kde  $\sum \Delta p$  je soumou tlakových ztrát všech tepelných výměníků,  $W_i$  je práce cyklu vykonaná v expanzním a kompresním prostoru a  $\Delta W$  je práce spotřebovaná na překonání vnitřních třecích sil v pracovním plynu. Tlakovou ztrátu  $\Delta p_i$  lze, vzhledem k známým veličinám v matematickém modelu, vypočítat po zavedení Blasiova vztahu, určujícího součinitel tření  $C_{f,i}$  v oblasti turbulentního proudění (Re > 4000) [8]:

$$\Delta p_i = - \frac{2C_{f,i} \mu_i u_i V_i}{D_{hyd,i}^2 A_i} = - \frac{2(0,0791 Re_i^{0,75}) \mu_i \dot{m}_i V_i l_i}{D_{hyd,i}^2 A_i m_i}, \quad (10)$$

kde  $\mu_i$  je dynamická viskozita plynu v příslušném výměníku,  $l_i$  délka výměníku a  $m_i$  hmotnost plynu v příslušné komoře.  $\Delta p_i$  je zintegrováno přes celý cyklus (0 do  $2\pi$ ) pro každý výměník zvlášť, dle rovnice (9), z které je pak vypočtena skutečná práce.

### Výpočet účinnosti SM a množství vyrobené elektrické a tepelné energie

Účinnost SM je dána

$$\eta_{SM} = \frac{P_{ef}}{\dot{Q}_{h,celk}} = \frac{Wf}{\dot{Q}_h + \dot{Q}_{ztr,r}}, \quad (11)$$

kde  $P_{ef}$  je efektivní výkon na hřídeli a  $\dot{Q}_{h,celk}$  celkový tepelný tok dodávaný SM přes ohřivač.

Množství elektrické energie vyrobené pouze ze slunečního záření za rok:

$$Q_{el,rok} = \sum_{i=1}^{8761} P_{ef,i} \eta_{al} 1h = \sum_{i=1}^{8761} P_{el,i} 1h = \sum_{i=1}^{8761} Q_{el,i}, \quad (12)$$

kde  $Q_{el,i}$  je množství el. energie vyrobené za i-tou hodinu v referenčním roce a  $\eta_{al}$  je účinnost alternátoru z naměřených hodnot na stávajícím SSM Eurodish v Odeillu. Množství tepelné energie, vyrobené z energie sluneční, je určeno za předpokladu, že tepelný tok z chladiče  $Q_k$  je roven tepelnému toku dodávanému budově. Tedy, množství tepelné energie za rok:

$$Q_{tep,rok} = \sum_{i=1}^{8761} Q_{k,i} = \sum_{i=1}^{8761} \dot{Q}_{k,i} 1h \quad (13)$$

kde  $Q_{k,i}$  je množství tepelné energie dodané chladičem za i-tou hodinu.

### Metoda řešení celkového matematického modelu

Jelikož rovnice v adiabatického modelu mají nelineární charakter je využito numerického řešení při daných provozních podmínkách a konfiguraci motoru. Provozními podmínkami jsou  $l_{b,n}$  a  $T_k$ . Konfigurace motoru je určena pracovními objemy  $V_c$ ,  $V_e$  a jejich změnami dle úhlu natočení klikové hřídele  $\theta$ ,  $dV_c$ ,  $dV_e$ , "mrtvémi" objemy tepelných výměníků  $V_k$ ,  $V_r$ ,  $V_n$ , a fyzikálními vlastnostmi pracovního plynu  $r$ ,  $c_p$ ,  $c_v$  a  $\kappa$ . Dále jsou provozními podmínkami dány teploty ohřivače  $T_h$  a chladiče  $T_k$ , a tedy i střední účinná teplota regenerátoru  $T_r$ . Stanovení celkové hmotnosti pracovního plynu  $m$  je problematické, neboť není zpravidla známým parametrem. Přístup, který byl využit k jeho řešení, vedl přes střední hodnotu tlaku a Schmidovu analýzu.

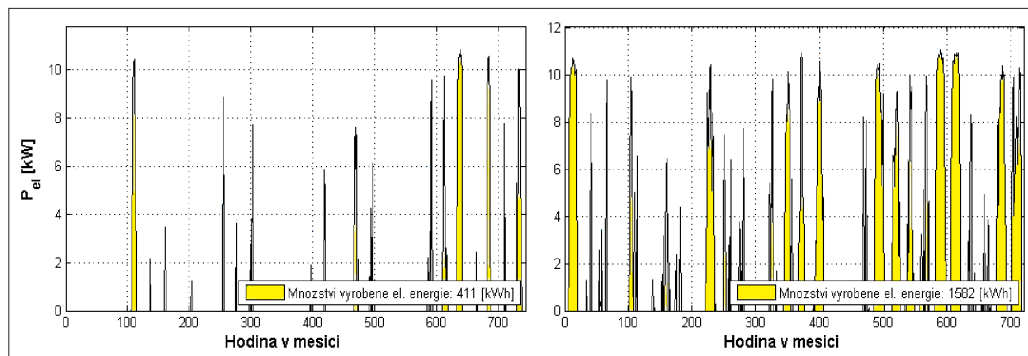
Kromě zmíněných konstantních parametrů, obsahují rovnice 22 proměnných a 16 jejich derivací, řešených přes celý cyklus ( $\theta = [0, 2\pi]$ ). Bylo třeba uvažovat stacionární proudění, kdy čtyři proměnné hmotnostní toky ( $\dot{m}_{ck}$ ,  $\dot{m}_{kr}$ ,  $\dot{m}_{rh}$ ,  $\dot{m}_{he}$ ) přešly v konstanty. Zbylo tak sedm obyčejných diferenciálních rovnic, které, při zadaných počátečních podmínkách, byly řešeny Runge-Kuttovou metodou.

### Výsledky

Pro validaci modelu MJ s SSM byly použity naměřené hodnoty na stávajícím SSM Eurodish v Odeillu se svolením francouzského Národního centra pro vědu a výzkum (CNRS). Na obr. 7 je zobrazeno porovnání hodnot hlavních provozních parametrů, získaných z počítačové simulace a hlavních provozních parametrů, získaných z měření na výše zmíněném experimentálním zařízení při stejných hlavních okrajových podmínkách:  $l_{b,n} = 900 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,  $p_{stř} = 7,5 \text{ MPa}$ ,  $f = 25 \text{ Hz}$ . Jak může být z obrázku patrné, nejvyšší procentuální odchylky mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami je dosaženo u účinnosti SM 9%. U ostatních parametrů nepřekročila odchylka 4% hranici. Výpočtový model byl tak shledán za validní.

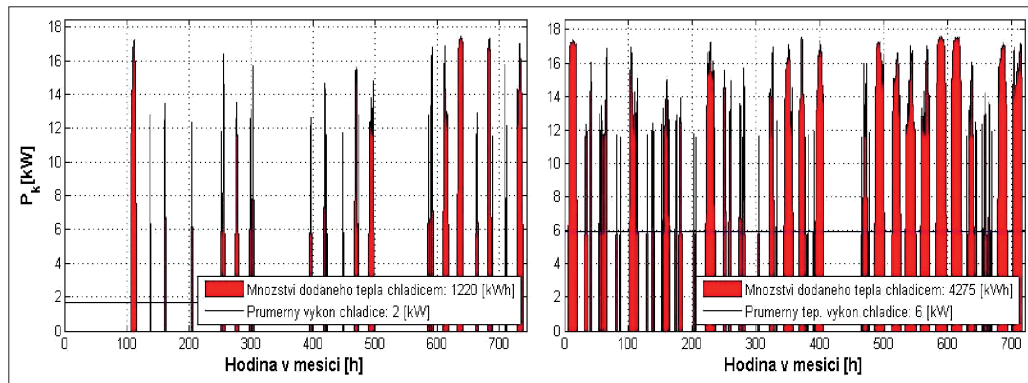
Na obr. 8 je porovnání průběhu elektrického výkonu  $P_{el}$  během ledna a června a množství vyrobené energie  $Q_{el}$  v Praze. Max. a min. dosažený

el. výkon za celý referenční rok byl  $P_{el,max} = 11,15$  kW, resp.  $P_{el,min} = 0,02$  kW (pokud bylo  $I_{0,n} = 0$ , pak  $P_{el} = 0$ ). Při  $P_{el,max}$  dosáhl SM své nejvyšší účinnosti  $\eta_{SM} = 36$  %. Celkové množství vyrobené el. energie pouze z přímého slunečního záření za měsíc leden bylo  $Q_{el,leden} = 411$  kWh, za měsíc červen  $Q_{el,červen} = 1,58$  MWh a za celý rok  $Q_{el,rok} = 13,38$  MWh.



Obr. 8 Porovnání průběhu el. výkonu  $P_{el}$  mikrokogenerační jednotky během ledna (vlevo) a června

Je zřejmé, že během dnů (ať už v lednu či v červnu) dochází v některých hodinách k nesouladu mezi potřebou el. energie a dostupností sluneční energie pro její výrobu. V letních měsících je ale větší pravděpodobnost souladu výroby el. energie s její poptávkou. Požadavek chlazení budov koreluje se solárními špičkami, takže MJ je ve většině případů schopna zajistit el. energii pro pohon klimatických zařízení (kompresor).



Obr. 9 Porovnání průběhu výkonu chladiče  $P_k$  mikrokogenerační jednotky během ledna (vlevo) a června

Obr. 9 porovnává průběhy výkonu chladiče  $P_k$  (tepelného výkonu) MJ opět během ledna a června. Dosažený max. a min. výkon chladiče je větší než u  $P_{el}$ :  $P_{k,max} = 17,96$  kW, resp.  $P_{k,min} = 11,56$  kW. Je to důkaz “neúčinnosti” SM, neboť nevyužitě teplo z přeměny slunečního záření na el. energii je po odečtení tepelných a třecích ztrát odevzdáno tepelnému jímáči – chladiči SM. Celkové množství tepelné energie dodané mikrokogenerační jednotkou za měsíc leden bylo  $Q_{k,leden} = 1,22$  MWh, za měsíc červen  $Q_{k,červen} = 4,27$  MWh a za celý rok  $Q_{k,rok} = 36,74$  MWh.

Poslední hodnota přibližně odpovídá roční potřebě tepla pro vytápění a ohřev teplé vody rodinného domu situovaného v Praze (Karlové) vypočtené na  $Q_{vyt+tv} = 35,2$  MWh. Nicméně, jak již bylo uvedeno výše u  $Q_{el}$ , samozřejmě i zde dochází k nesouladu mezi potřebou tepla a solárního zisku. Řešení výše zmíněného nesouladu by předpokládalo velkoobjemový sezónní zásobník s akumulací látkou (nejčastěji voda), jehož objem by byl řádově srovnatelný s objemem rodinného domu [10]. Použití akumulčního vodního zásobníku o objemu  $V_{ak} = 100$  m<sup>3</sup>, u kterého by byly uvažovány tepelné ztráty, by v případě průměrného rodinného domu pokrylo potřebu tepla z poloviny.

Pokud by se jednalo o nízkoenergetický či pasivní rodinný dům se standardní obytnou plochou kolem 100 m<sup>2</sup>, pokryla by MJ plně její potřebu tepla.

## ZÁVĚR

Výsledky počítačové simulace ukázaly, že MJ se SSM je spolu s velkoobjemovým zásobníkem tepla schopna pokrýt z 50 % potřebu tepelné energie na vytápění a ohřev teplé vody průměrného rodinného domu se 4 osobami v Praze. Vedle toho MJ vyrobí dalších 13,38 MWh el. energie, a to vše pouze z přímé intenzity slunečního záření.

Vyrobené množství sice představuje dostatečné pokrytí potřeby el. energie průměrného rodinného domu, avšak nespĺňuje soulad její okamžité potřeby s okamžitou nabídkou. V případě akumulace elektrické energie by

kapacita akumulátorů byla značná a celá jednotka by tak byla ekonomicky neúnosná. Na druhou stranu, praktické realizace a provoz velkoobjemových zásobníků tepla se slunečními kolektory poukazují na nejednoznačnost výhodných ekonomických parametrů.

Na základě problému s akumulací přebytečné el. energie je v současné době simulována činnost plynového hořáku integrovaného do kolektoru SSM. Cílem je stanovit množství spotřebované energie obsažené v zemním plynu za ročního provozu, při kterém je jeho okamžitý výkon závislý na potřebě el. nebo tepelné energie a intenzitě přímého slunečního záření. Cílem analýzy výsledků bude technicko-ekonomické hodnocení provozu MJ s hybridním SSM v klimatických podmínkách ČR.

Tento článek vychází z výzkumného záměru MŠM 6840770011 Technika životního prostředí

Kontakt na autora: [stepan.nosek@seznam.cz](mailto:stepan.nosek@seznam.cz)

## Seznam použitých značek

- $c$  měrná tepelná kapacita [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>]
- $f$  frekvence [Hz]
- $l$  délka [m]
- $m$  hmotnost [kg]
- $\dot{m}$  hmotnostní tok [kg.s<sup>-1</sup>]
- $p$  tlak [Pa]
- $r$  měrná plynová konstanta [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>]
- $A$  průřez, plocha [m<sup>2</sup>]
- $D$  průměr [m]
- $I$  intenzita záření [W.m<sup>-2</sup>]
- $P$  výkon [W]
- Pr Prandtlovo číslo [-]
- $Q$  množství energie [J]
- $\dot{Q}$  tepelný tok [W]
- $R$  univerzální plynová konstanta [J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>]
- Re Reynoldsovo číslo [-]
- St Stantonovo číslo [-]

$T$	termodynamická teplota [K]
$V$	objem [ $m^3$ ]
$W$	práce [J]
$\alpha$	součinitel přestupu tepla [ $W.m^{-2}.K^{-1}$ ]
$\eta$	účinnost [-]
$\theta$	úhel natočení klikové hřídele [ $^\circ$ ]
$\lambda$	tepelná vodivost [ $W.m^{-1}.K^{-1}$ ]
$\kappa$	Poissonův poměr [-]
$\mu$	dynamická viskozita [Pa.s]

**Indexy**

b	přímého záření
c	kompresního prostoru
e	expanzního prostoru
g	plynu
f	za jeden cyklus, tření
h	ohřívače
k	chladiče, konvekci
m	motoru
n	normální
p	při konstantním tlaku
r	regenerátoru
w	stěny
clk	celkový
ck	rozhraní kompresního prostoru a chladiče
ef	efektivní
el	elektrický
he	rozhraní ohřívače a expanzního prostoru
hyd	hydraulický
kr	rozhraní chladiče a regenerátoru
pl	plášť
rh	rozhraní regenerátoru a ohřívače
rok	roční
vyt	vytápění
wg	smáčené stěny
ztr	ztráty
$\Delta$	rozdíl

**Zkratky**

IAM	– Ideální adiabatický model
SM	– Stirlingův motor
SSM	– Stirlingův solární motor

**Použité zdroje:**

- [1] Bakcha, K., Somchai, W.: A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines, In: Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2003, vol. 7, p. 131-154.
- [2] Stine, W. B., Diver, R. P.: A Compendium of Solar Dish/Stirling Technology, Sandia National Laboratories, Albuquerque, 1994.
- [3] Keck, T., Heller P., Reinalter, W.: Eurodish-continuous operation, systém improvement and reference units, Proceeding of the 13th SolarPACES International Symposium, Seville, Espagne, 2006.
- [4] Nosek, Š.: Přeměna sluneční energie na mechanickou – Stirlingův solární motor, 2007, ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ú12116: Praha. 67 s.
- [5] Nosek, Š.: Mikrokogenerační jednotka s hybridním Stirlingovým solárním motorem, 2008, ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ú12116: Praha. 35 s.
- [6] Urieli, I.: Stirling cycle machine analysis [online].Ohio University, Dept of Mechanical Engineering: 1. 1. 2007 [cit. 24.4. 2007]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.ent.ohiou.edu/~urieli/stirling/me422.html>>.
- [7] Dyson, R. W., Wilson, S. D.:Review of computational Stirling analysis Metod, In Proceedings of the 2nd International Conversion Engineering Conference, 2004, Providence, Rhode Island, Tew, R.C.
- [8] Organ, A.: The Regenerator and the Stirling Engine, Mech. Eng., London and Bury St. Edmunds, 1997.
- [9] Kays, W. M., London, A. L.: Compact heat exchangers, McGraw-Hill, New York, 1964.
- [10] Matuška, T., Šourek, B.: Solární soustava s vodním sezónním zásobníkem pro 100 % pokrytí potřeby tepla pro vytápění nízkoenergetického domu, Conference on thermal storage, 14. 3. 2008, Prague. ■