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

Recenzent

Ing. Zdeněk Lerl

Simulace mikrokogenerační jednotky s hybridním Stirlingovým solárním motorem



Simulation of Micro Co-Generation Unit with a Hybrid Stirling Solar Motor.

V [1] byl prezentován nový koncept mikrokogenerační jednotky (MJ) s hybridním Stirlingovým solárním motorem (SSM) spolu s jeho matematickým modelem vytvořeným v prostředí MATLAB. Analýza výsledků počítačové simulace matematického modelu v tzv. solárním režimu provozu (výroba el. energie a tepla pouze z přímého slunečního záření), situovaném v Praze, stanovila značné množství vyrobené elektrické a tepelné energie za rok, jmenovitě Q_{el} = 13,38 MWh a Q_{tep} = 36,74 MWh. Nicméně, ať už elektrická či tepelná energie, nebyla v časové korelaci s jejím požadavkem. V článku se autor zabývá tzv. hybridním režimem provozu, kdy výkon plynového hořáku, integrovaný do kolektoru SSM, je závislý na potřebě elektrické a tepelné energie budovy (rodinného domu) a intenzitě přímého slunečního záření. Bylo využito integrace matematického modelu MJ s hybridním SSM z prostředí MATLAB do simulačního prostředí TRNSYS. Výsledky simulace poukázaly na možnosti optimalizace provozu MJ a tedy navýšení celkové účinnosti kogenerace s ohledem na maximální využití vyrobeného odpadního tepla.

Klíčová slova: Stirlingův solární motor, mikrokogenerační jednotka, TRNSYS, MATLAB

New concept of micro co-generation unit with hybrid Stirling solar motor (SSM) was presented in [1] together with its mathematical model created in the MATLAB environment. The result analysis of the mathematical model computer simulation in so called solar operation mode (production of electric energy and heat from the direct solar radiation, only), situated in Prague, determined a significant volume of electric energy or heat energy generated annually, nominally $Q_{el} = 13.38$ MWh and $Q_{tep} = 36.74$ MWh. Nevertheless, whether electric energy or heat energy, it was not in a time correlation with requirement.

In the article, Author is engaged in so called hybrid mode of operation, in which the output of the gas burner, integrated in the SSM collector, is dependent upon the requirement of the electric energy and heat energy in a building (a single family house) and intensity of the direct solar radiation. The integration of the micro co-generation unit with hybrid SSM in the MATLAB environment was utilized for the simulation in the TRNSYS environment.

Results of simulation have pointed out to the possibility of optimization of micro co-generation unit, and thus to increase the total effectiveness of co-generation with respect to the maximum utilization of the generated exhaust heat. **Key words:** Stirling solar motor, micro co-generation unit, TRNSYS, MATLAB

ÚVOD

Nový koncept mikrokogenerační jednotky (MJ) s hybridním Stirlingovým solárním motorem (SSM) představuje využití Stirlingova motoru (SM) pro výrobu el. energie a tepla nejen ze sluneční energie, ale i z energie tepelné, vzniklé spalováním plynu v plynovém hořáku umístěném v kolektoru SSM [1]. Je tak možné kompenzovat nedostatek přímého slunečního záření v době potřeby el., nebo teplené energie, který je typický pro lokality ve vyšších zeměpisných šířkách, např. v ČR.

V [1] byl prezentován matematický model tohoto nového konceptu vytvořený v prostředí MATLAB, zohledňující solární režim provozu, kdy el. a tepelná energie je vyrobena pouze z přímého slunečního záření. Výsledky počítačové simulace ukázaly, že MJ je schopna během jednoho roku vyrobit až 36,74 MWh tepelné a 13,38 MWh el. energie. Analýza výsledků však potvrdila, že toto vyrobené množství energie je v časovém nesouladu s jeho potřebou.

Řešení a vyhodnocení této problematiky prokazuji na praktickém příkladu tzv. hybridního režimu provozu, kdy výkon plynového hořáku je závislý na potřebě el. a tepelné energie budovy a intenzitě přímého slunečního záření.

K simulaci bylo použito simulační prostředí TRNSYS (TRaNsient SYstem Simulation) – modulární program pro simulaci dynamického chování tepelně energetických systémů (zejména solárních systémů, budov a jejich technických zařízení) v průběhu určitého časového období s definovaným krokem výpočtu [2]. Pro analýzu hybridního režimu provozu MJ byl v tomto prostředí vytvořen model celkového energetického sytému MJ – budova zohledňující hlavní energetické potřeby domácnosti – el. energii a teplo pro vytápění a ohřev teplé vody – během jednoho roku. Pro začlenění stávajícího matematického modelu MJ s hybridním SSM do celkového modelu vytvořeného v prostředí TRNSYS byl použit speciální modul pro volání prostředí MATLAB (Type155). Za lokalitu, která definovala klimatické podmínky, byla zvolena Praha.

NÁVRH CELKOVÉHO MODELU

Celkový model energetického systému MJ – budova se skládá z 5 hlavních modelů: budovy (B), otopné soustavy (OS), tepelného výměníku (V), zásobníku teplé vody (Z) a MJ.

Na obr. 1. je znázorněn přehled uvažované energetické bilance celkového modelu. Hlavními energetickými vstupy jsou energie přímého slunečního záření Q_{soh} která je dána součinem intenzity přímého slunečního záření $I_{b,n}$ a plochou koncentrátoru SSM S_{kon} , a energie obsažená v zemním plynu Q_{plyn} . Výstupy pak jsou el. energie dodaná do objektu $Q_{el,p}$ do rozvodné sítě $Q_{el,dod}$, tepelné a mechanické ztráty MJ $Q_{ztr,MJ}$ a tepelné ztráty budovy Q_{ztr,B_J} přičemž platí

$$Q_{ztr,B} = Q_{vyt}, \tag{1}$$

$$Q_{ztr,MJ} = \left(Q_{sol} + Q_{plyn}\right) - \left(Q_{vyt} + Q_{tv} + Q_{el,p} + Q_{el,dod}\right), \tag{2}$$



Obr. 1 Přehled energetické bilance modelu MJ – budova

Vstup: energie z přímého slunečního záření $Q_{\rm sol}$ a energie obsažená v zemním plynu $Q_{\rm nlvn}$

Výstup: el. energie dodaná do rozvodné sítě $Q_{el,dod}$, tepelné a mechanické ztráty MJ, $Q_{ztr,MJ}$, a tepelné ztráty budovy $Q_{ztr,B}$. Platí, že $Q_{ztr,B} = Q_{vyt}$ a $Q_{ztr,MJ} = (Q_{sol} + Q_{plyn}) - (Q_{vyt} + Q_{pl,p} + Q_{el,dod})$

kde *Q_{vyt}* značí potřebu tepla na vytápění a *Q_{tv}* potřebu tepla pro ohřev teplé vody. Schéma výše zmíněného celkového modelu vytvořeného v prostředí TRNSYS je znázorněno na obr. 2. Jeho jednotlivé části (modely) jsou popsány v následujících statích.

Model budovy

Pro model budovy byl v prostředí TRNSYS použit modul Type56, využívající tzv. multi-zónový model budovy, který je možno editovat v podprogramu TRNBuild [3].

Byl navržen nízkopodlažní dům se 4 místnostmi o celkové užitné ploše 115 m² a užitném objemu 316 m³, tak, aby odpovídal standardnímu rodinného domu v Praze. Tepelně technické vlastnosti pláště budovy byly nastaveny v rozmezí vyhláškou doporučených hodnot součinitele prostupu tepla. Tepelná ztráta byla stanovena z maximální dosažené hodnoty tepelné ztráty během simulačního výpočtu za jeden rok, při stacionárních výpočtových (výpočetní krok = 1 hodina) a klimatických podmínkách meteorologického roku (TMY2) pro Prahu, na $Q_{ztr,B,max}$ = 6110 W. Při zahrnutí vnitřních tepelných zisků (osoby, elektrospotřebiče) se tepelná ztráta budovy snížila na $Q_{ztr,B,max}$ = 5940 W. Jelikož model budovy s vnitřními tepelnými zisky více odpovídá realitě, byl použit v simulaci celkového modelu za podmínky, že okamžitá tepelná ztráta je rovna okamžitému potřebnému tepelnému výkonu pro pokrytí tepelné ztráty budovy ($\dot{Q}_{ztr,B} = \dot{Q}_{vyl}$).

Pro simulaci potřeby el. energie $Q_{el,p}$ během celého roku byl vytvořen denní profil průměrného hodinového potřebného el. příkonu $P_{el,p}$ zohledňujícího současnost provozu el. spotřebičů v průměrné pražské domácnosti se 4 osobami. Jelikož MJ využívá pro hybridní provoz konvenční zdroj energie zemní plyn, byl např. uvažován plynový vařič místo elektrického (obr. 3). Každá hodinová hodnota $P_{el,p}$ v tomto profilu pak byla vynásobena koeficientem zohledňujícím spotřebu el. energie v příslušném měsíci. Koeficient tak nabýval hodnoty od 0,6 do 1 podle toho, ve kterém měsíci se nacházel krok výpočtu (např. pro listopad až únor odpovídá 1, pro červe-





Obr. 2 Schéma celkového modelu MJ-budova vytvořeného v prostředí TRNSYS

nec až srpen 0,6). Tím byl zohledněn vliv venkovní teploty t_e a slunečního svitu na $P_{el,p}$ [4].

Model otopné soustavy

Otopnou soustavou (OS) bylo uvažováno podlahové vytápění se jmenovitým teplotním spádem 40/30 °C a konstantním průtokem \dot{m}_{otop} odpovídajícím max. tepelné ztrátě budovy. Chování OS bylo simulováno dle ekvitermní regulace s vlivem zátěže (regulátor R2 na obr. 2). Ekvitermní teplota t_{ekv} byla vypočtena v externím programu Excel (volaný modulem Type62) na základě dvou vstupních veličin z prostředí TRNSYS: venkovní teploty t_e a potřebného tepelného výkonu pro pokrytí tepelné ztráty budovy \dot{Q}_{vyt} . Trojcestným směšovacím ventilem (TSV, modul Type11) pak byl zajištěn, na základě vypočtené t_{ekv} potřebný směšovací poměr dvou průtoků – průtoku ohřáté otopné vody ve výměníku $\dot{m}_{o,V,s}$, na teplotu $t_{o,b}$ a průtoku vratné vody ze soustavy \dot{m}_{mix} o teplotě vratné vody z OS $t_{o,otop}$ – tak, aby byla dosažena potřebná teplota otopné vody $t_{i,otop}$.

Model tepelného výměníku

V celkovém modelu je MJ spojena s otopnou soustavou přes tepelný výměník (V) z potřeby oba systémy od sebe hydraulicky i teplotně oddělit (obr. 2). Pro model výměníku byl v prostředí TRNSYS použit modul Type91. Jedná se o model tepelného výměníku s definovanou konstantní účinností η_{v_i} ve kterém je maximální možný výkon tepelného výměníku $\dot{Q}_{v,max}$ vypočten z minimální kapacity průtoku C_{min} na chladné či teplé straně výměníku (C_{s^*} resp. C_t) a vstupních teplot tekutiny na chladné a teplé straně výměníku. Dle obr. 2 tedy platí

$$\dot{Q}_{V,max} = C_{min} \left(t_{o,mj} - t_{i,V,s} \right), \tag{3}$$

kde $t_{i,V,s} = t_o$, otop a $C_{min} = C_t = \dot{m}_{i,V,t}c_{w,t}$ nebo $C_{min} = C_s = \dot{m}_{i,V,s}c_{w,s}$, podle toho, která kapacita průtoku nabývá minimální hodnoty. Skutečný výkon výměníku je pak

$$\dot{Q}_{V} = \dot{Q}_{V,max} \eta_{V}, \tag{4}$$

kde za η_{v} byla zvolena průměrná účinnost 75 %.

Model zásobníku teplé vody

Pro model zásobníku teplé vody (Z) byl v prostředí TRNSYS použit modul Type4c, modelující tzv. teplotní stratifikaci, kdy teplo z MJ je přiváděno do příslušné teplotní hladiny v zásobníku. Zásobník byl rozdělen do 3 stejně vysokých vrstev tak, že výška jedné vrstvy odpovídala 1/3 výšky zásobníku.

Pro simulaci spotřeby teplé vody byl použit modul Type14b, ve kterém byl nastaven denní profil průměrného průtoku studené vody m_{tv.s} pro každou hodinu o teplotě t_{hvs} pro daný počet osob. Odebíraný tepelný výkon pro ohřev teplé vody Q₁, se uskutečňoval v nejvyšší vrstvě přes vnitřní tepelný výměník zásobníku:

$$\hat{Q}_{tv} = \dot{m}_{tv,z,s} c_{w,s} (t_{tv,t} - t_{tv,s}),$$
(5)

kde $\dot{m}_{tv,z,s}$ je průměrný průtok studené vody o teplotě $t_{tv,s}$ vstupující do vnitřního výměníku a t_{tv,t} je teplota vody vystupující na konci tohoto výměníku (obr. 2). TSV pak na základě potřebného poměru průtoků m_{tv.z.s} a $\dot{m}_{tv,mix,s}$ zajišťoval nastavenou teplotu teplé vody (t_{tv} = 45 °C). Objem zásobníku byl stanoven z měrné spotřeby teplé vody 50 l/os.den.

Model MJ

Matematický model MJ, který byl vytvořen v prostředí MATLAB a volán prostředím TRNSYS modulem Type155, je založen na tzv. ideálním adiabatickém modelu SM (IAM), detailněji popsaném v [5]. Vzhledem k simulaci hybridního režimu provozu byl model MJ rozšířen v prostředí MATLAB o modelování regulace výkonu plynového hořáku Q_{hor} (integrovaného do kolektoru SSM) znázorněné na obr. 2 regulátorem R1. Regulovaná veličina Q_{hor} se na základě vstupních akčních veličin z prostředí TRNSYS (I_{b.n}, P_{wt}, a $P_{el,p}$) řídila dle následujících podmínek:

- Pokud není přítomna I_{b,n} je Q_{hor} určen 1.
- $z P_{el,p}$, pokud $\dot{Q}_{k,el} \ge P_{vyt}$ $z \dot{Q}_{vyt}$, pokud $\dot{Q}_{k,el} < P_{vyt}$ 1.1.
- 1.2.

(kde Q_{k.el} značí předběžný (porovnávací) tepelný výkon chladiče, určený z el. výkonu SM, viz. text níže).

- Pokud je přítomna $I_{b,n}$ je \dot{Q}_{hor} určen 2.
- 2.1.
- pouze z $I_{b,n}$, pokud $\dot{Q}_{el} \ge P_{el,p} \land \dot{Q}_k \ge P_{vyt}$ z $\Delta P_{el,p}$, pokud $\dot{Q}_{el} < P_{el,p} \land Q_k \ge P_{vyt}$, přičemž platí $\Delta P_{el,p} = P_{el,p} \dot{Q}_{el}$ 2.2.
- $z \Delta P_{vyt}^{\sigma, p}$, pokud $\dot{Q}_{el} \ge P_{el, p} \land \dot{Q}_k < P_{vyt}$, přičemž platí 2.3.
- $\Delta P = P_{vyt} \dot{Q}_{k}$ $z \Delta P_{el,p}, \text{ pokud } \dot{Q}_{el} < P_{el,p} \land (\dot{Q}_{k} < P_{vyt} \land \dot{Q}_{k,el} \ge P_{vyt})$ $z \Delta P_{vyt} \text{ pokud } \dot{Q}_{k} < P_{vyt} \land (\dot{Q}_{el} \ge P_{el,p} \land \dot{Q}_{k,el} < P_{vyt}),$ 2.4.
- 2.5.

(kde Q_k značí tepelný výkon chladiče).

3. Pokud
$$\dot{Q}_{el} > P_{el,p}$$
 pak je přebytečný el. výkon MJ
 $\dot{Q}_{el,dod} \left(\dot{Q}_{el,dod} = \dot{Q}_{el} - P_{el,p} \right)$ dodáván do vnější rozvodné sítě.

Tepelný příkon potřebný pro vytápění Pvyt byl stanoven z Qvyt, účinnosti tepelného výměníku c_v a z přirážky na tepelné ztráty v rozvodech p:

$$P_{vyt} = \frac{\dot{Q}_{vyt}(1+p)}{\eta_v}$$
(6)

Pro určení požadovaného příkonu, podle kterého je řízen Q_{hor} v případě nepřítomnosti I_{b,n} (P_{el,p} nebo P_{vyt}, viz. 1. podmínka), je nejprve vypočten předběžný výkon chladiče $\dot{Q}_{k,e^{l}}$ polynomickou funkcí získanou z funkční závislosti výkonu chladiče \dot{Q}_{k} na el. výkonu SM (resp. MJ) $\dot{Q}_{e^{l}}$. Pokud, $\dot{Q}_{k,el} < P_{vyt}$, resp. $\dot{Q}_{k,el} \ge P_{vyt}$, je za požadovaný příkon určen P_{vyb} resp. $P_{el,p}$, z kterého je následovně vypočtena polynomickou funkcí hlavní vstupní proměnná pro IAM – střední teplota žárnic ohřívače SM T_h. Funkční závislosti Q_k na P_{el,SM}, T_h na Q_k a P_{el,SM} byly získány z dříve provedené simulace IAM [5].

V případě přítomnosti I_{b.n} (2. podmínka) je určen požadovaný výkon obdobně. Vstupuje tu však navíc možnost vyrobit el. a tepelnou energiei pouze z energie sluneční (z I_{b.n}), nebo možnost snížit výkon plynového hořáku Q_{hor} o získané množství energie z I_{b.n}. Potřebný příkon, P_{vvt}, resp. P_{el.p}, je tak snížen na ΔP_{vyt} , resp. na $\Delta P_{el,p}$.

Závěrečná 3. podmínka je doplňkem podmínky 2.1 a 2.3, neboť nadbytečná el. energie může být vyrobena pouze tehdy, když je přítomno I_{b.n} a zároveň $Q_{el} \ge P_{el,p}$.

Pro výpočet teploty ohřáté vody v chladiči MJ byly do modelu MJ z prostředí TRNSYS zavedeny další 2 veličiny – konstantní hmotnostní průtok vody $\dot{m}_{i,mi}$, skládající se z průtoku vody proudící z tepelného výměníku (V) na teplé straně, m_{o,V,t}, a průtoku vody proudící ze zásobníku teplé vody $\dot{m}_{o,z}(\dot{m}_{o,z} = \dot{m}_{i,z})$ a teplota vody vstupující do chladiče MJ $t_{in,mj}$, vzniklá smíšením obou výše zmíněných průtoků o teplotě t_{o, V,t} a t_{o, z} (obr. 2). Hodnota průtoku $\dot{m}_{o,V,t}$, resp. $\dot{m}_{o,z}$, byla nastavena dle \dot{m}_{otop} , resp. dle max. průtoku m_{w.s}. Na základě těchto vstupních veličin byla v modelu MJ explicitně vypočtena teplota vody vystupující z chladiče MJ

$$t_{o,mj} = t_{i,mj} + \frac{\dot{Q}_{k}}{(\dot{m}_{i,mj}c_{v})}.$$
(7)

Model MJ tak přijímá z prostředí TRNSYS 5 vstupů (I_{b.n}, P_{el.p}, Q_{vvt}, t_{in.mi},) a vrací 5 výstupů ($Q_{hor}, Q_{el,dod}, Q_k, \dot{m}_{i,mi}, t_{o,mj}$).

Při splnění 1. podmínky byl potřebný výkon plynového hořáku Q_{plyn} stanoven z účinnosti hořáku η_{hon} chladiče MJ η_k a tepelného výměníku η_V (podmínka 1.1), resp. alternátoru η_{Al} a SM η_{SM} (podmínka 1.2):

$$\dot{Q}_{hor} = \frac{P_{vyt}}{\eta_{hor}\eta_k}, \text{ resp. } \dot{Q}_{hor} = \frac{P_{el,p}}{\eta_{hor}\eta_{Al}\eta_{SM}},$$
(8)

kde η_k a η_{SM} byly vypočteny v IAMu pro dané Q_k , resp. $P_{el,p}$ [3]. Učinnosti hořáku a alternátoru byly uvažovány konstantní ($\eta_{hor} = 0.9$, resp. $\eta_{aAI} =$ 0.925).

V případě podmínek 2.2 až 2.5 se výpočet pro Q_{plvn} řídil podobným vztahem:

$$\dot{Q}_{hor} = \frac{\Delta P_{vyt}}{\eta_{hor}\eta_k}, \text{ resp. } \dot{Q}_{hor} = \frac{\Delta P_{el,p}}{\eta_{hor}\eta_{Al}\eta_{SM}}.$$
(9)

Optimalizace celkového modelu

Celkový model MJ – budova byl v prostředí TRNSYS simulován za účelem nalezení optimální bilance energetických toků (obr. 1.), která představuje co největší využití sluneční energie (konkrétně I_{b,n}) k pokrytí Q_{el,p}, Q_{vyt} a Q_{tv} s co nejmenším využitím konvenčního zdroje energie Q_{plyn}.

Na základě hodnoty max. tepelného výkonu chladiče Q_{k,max} = 17,74 kW stanovené z dřívější simulace MJ v solárním režimu provozu [5], byl nalezen n násobek max. možné tepelné ztráty modelované budovy, kterou je možno zajistit z provozu MJ

$$n = \frac{Q_k \eta_V}{\dot{Q}_{ztr,B}(1+p)} = 2,04 [-]$$
(10)

kde přirážka na zvýšení potřeby tepla o ztráty tepla v rozvodech byla uvažována p = 0,1. Stanovený n násobek tak představoval rozšíření modelu budovy o dvojnásobek obytné plochy, osob (pro určení spotřeby TV a objemu zásobníku tepla) a max. potřebného okamžitého el. příkonu Pel, p. max, přičemž P_{el,p,max} nepřekročil max. okamžitý el. výkon MJ Q_{el,max} (pro dvě domácnosti byl uvažován P_{el,p,max} = 10 kW, přičemž Q_{el,max} = 11,2 kW [5]).



Obr. 4 Detail časových průběhů výkonů v celkovém modelu z otopného období (30. 1. až 1. 2., výpočetní krok = 1 [h]): výkon hořáku \dot{Q}_{hor} (tmavě modře), výkon chladiče \dot{Q}_k (fialově), potřebný el. příkon $P_{el,p}$ (oranžově), el. výkon dodávaný do rozvodné sítě $\dot{Q}_{el,dod}$ (zeleně), potřebný tepelný výkon na vytápění \dot{Q}_{vyt} (světle modře), výkon tepelného výměníku \dot{Q}_v (růžově), výkon pro ohřev teplé vody \dot{Q}_w (hnědě) a intenzita přímého slunečního zářená l_{bn} (červeně)

Hodnocení efektivity provozu MJ

Pro vyhodnocení provozu MJ s hybridním SSM byly odvozeny následující ukazatele:

Solární podíl

Vyjadřuje množství využitelné energie (el. i tepelné) vyrobené MJ pouze z $I_{b,n}$, $Q_{u,soh}$, ku celkové energetické potřebě budovy $Q_{a,b}$, tedy

$$f_{sol} = \frac{Q_{u,sol}}{Q_{p,B}} = \frac{Q_{k,sol} + Q_{el,sol}}{Q_{vyt} + Q_{tv} + Q_{el,p} + Q_{el,dod}},$$
(11)

kde $Q_{el,soh}$ resp. $Q_{k,sol}$ je množství el., resp. tepelné energie vyrobené MJ pouze z energie sluneční (z $I_{b,n}$).

Využitelnost sluneční energie

Umožňuje náhled kolik sluneční energie, zachycené koncentrátorem MJ, je možné využít

$$f_{u,sol} = \frac{Q_{u,sol}}{Q_{sol}} = \frac{Q_{k,sol} + Q_{el,sol}}{I_{bn}S_{kon}},$$
(12)

kde Q_{sol} je množství energie dopadlé na koncentrátor a S_{kon} celková plocha koncentrátoru.

Účinnost výroby elektrické energie

Účinnost výroby el. energie je definována jako poměr celkové vyrobené el. energie MJ k celkové dodané energii MJ:

$$\eta_{el} = \frac{Q_{el,p} + Q_{el,dod}}{Q_{plvp} + Q_{sol}}.$$
(13)

Účinnost kogenerace

Tento ukazatel definuje celkovou účinnost kogenerace za předpokladu, že je veškeré odpadní teplo využito:

$$\eta_{kog} = \frac{Q_{el,p} + Q_{el,dod} + Q_k}{Q_{plyn} + Q_{sol}}$$
(14)

 η_{koq} tedy určuje nejvyšší možnou celkovou účinnost MJ s hybridním SSM.

Obr. 5 Detail časových průběhů výkonů v celkovém modelu z letního období (23. 7. až 26. 7.), výpočetní krok = 1 [h]): výkon chladiče \dot{Q}_k (tmavě modře), výkon hořáku \dot{Q}_{hor} (fialově), potřebný el. výkon $P_{el,p}$ (oranžově), el. výkon dodávaný do rozvodné sítě $\dot{Q}_{el,dod}$ (zeleně), výkon pro ohřev teplé vody \dot{Q}_{tv} (světle modře) a intenzita přímého slunečního zářená I_{bn} (červeně)

Účinnost využité kogenerace

5.67E+04

Oproti η_{kog} je účinnost využité kogenerace $\eta_{kog,u}$ nižší, neboť záleží na stupni využití vyrobeného tepla:

$$\eta_{kog,u} = \frac{Q_{el,p}Q_{el,dod} + Q_V + Q_{tv}}{Q_{plyn} + Q_{sol}}.$$
(15)

Účinnost využité kogenerace $\eta_{\mathrm{kog},u}$ je tak reálnějším ukazatelem provozu MJ s hybridním SSM.

Výsledky simulace a jejich analýza

Pro názornost byla simulace rozdělena na dva hlavní časové úseky: od 15. 9. do 15. 5. (otopné období v délce 242 dnů, resp. 5808 hodin) a od 15. 5. do 15 .9. (letní období v délce 123 dnů, resp. 2952 hodin) .

Na obr. 4, resp. na obr. 5, je zobrazen detail průběhů výkonů v celkovém modelu z otopného, resp. letního období. Detaily zahrnují časový úsek tří dnů, konkrétně od 30. 1. do 1. 2., pro otopné období a od 23. 7. do 26. 7. pro období letní.

Z obou detailů je patrný vliv I_{b,n}, P_{el,p}, Q_{vyt} a Q_{tv} na Q_{hor}. V případě přítomnosti I_{b,n} je nižší (nebo nulový) než při absenci I_{b,n}, a stejném P_{el,p}, \dot{Q}_{vyt} a \dot{Q}_{tv} . Je to důkaz efektivní regulace s ohledem na využití sluneční energie a potřebných el. a tepelných výkonů. Během otopného období splývá křivka výkonu tepelného výměníku \dot{Q}_v s křivkou \dot{Q}_{vyt} (obr. 4), takže je zajištěno potřebné teplo na vytápění.

*Křivka I*_{b,n} nabývá na obr. 4, resp. obr. 5, nízkých hodnot, neboť je udána v měrné jednotce [kJ/(h.m²)]. Po vynásobení plochou koncentrátoru S_{kon} = 53 m² nabývá hodnot 53 × vyšších, přičemž nejvyššího možného solárního výkonu ($\dot{Q}_{sol,max}$ = 48,7 kW) je dosaženo při $I_{b,n,max}$ = 990 W/m² v otopném období.

Další max. hodnoty jednotlivých výkonů během daného období jsou prezentovány na obr. 6. Druhý nejvyšší výkon byl dosažen u plynového hořáku, a to v otopném období ($Q_{hor,max,o}$ = 32,9 kW), v letním období se snížil více než o dvě třetiny ($\dot{Q}_{hor,max,i}$ = 9,7 kW). Max. tepelný výkon chladiče ($\dot{Q}_{vyt,max}$ = 15,6 kW) je získán při $I_{b,n,max}$ a splňuje podmínku, že je větší než nejvyšší společná tepelná ztráta dvou budov ($\dot{Q}_{vyt,max}$ = 10,4 kW) o ztráty v tepelném výměníku a v rozvodech. Max. potřebný výkon k ohřátí teplé

6.7.



Obr. 6 Maximální hodnoty výkonů v celkovém modelu během otopného (modře) a letního (fialově) období

vody je v otopném období stejný jako v období letním ($Q_{tv,max}$ = 3,3 kW), přičemž teplota výstupní teplé vody t_{tv} nepoklesla během celého simulovaného roku pod 45 °C. Odpadní teplo z chladiče MJ, vedle potřebného tepla pro vytápění, tak zajistilo i dost tepla pro ohřev teplé vody.

Na obr. 7. je znázorněna ve sloupcovém grafu hlavní energetická bilance celkového modelu za otopné (modře) a letní (fialově) období a za celý rok (bíle). Hodnota celkového energetického vstupu Q_{dod} se skládá ze zachycené sluneční energie koncentrátorem Q_{sol} a energie obsažené v konvenčním palivu – zemním plynu Q_{plyn} (obr. 8). Z grafu můžeme vidět, že za otopné období je Q_{dod} 2,5 × větší než za období letní. Pro zdůvodnění tohoto nepoměru nám napomáhá další graf provozních ukazatelů na obr. 9. Zde odpovídá solární poddíl pro otopné období hodnotě f_{solo} = 19 % a pro období letní f_{soll} = 62 %. Je tedy zřejmé, že v letním období má na výrobu potřebných energií sluneční energie trojnásobně větší poddíl než v období otopném, což se promítá i do hlavní energetické bilance. V porovnání s konvenčními solárními systémy (např. se solárními kolektory) má MJ v letním období až o 12 % větší solární krytí. Z obr. 9 je vidět i provázanost solárního podílu f_{sol} s využitelností sluneční energie f_{solu}: stoupá-li hodnota f_{sol}, klesá f_{sol.u}. Zatímco v létě je až 79 % sluneční energie nevyužito, v zimě je to 63 %. Je to důkaz časového nesouladu proměnlivého P_{el,p} a potřeby $Q_{vvt} \le I_{b,n}$.

Celkový energetický výstup z MJ Q_{vyr} je uvažován ve dvou variantách: buď je Q_{vyr} roven součtu veškeré vyprodukované el. a tepelné energie ($Q_{vyr} = Q_{el,p} + Q_{el,dod} + Q_k$), nebo součtu veškeré el. a využité tepelné energie ($Q_{vyr,u} = Q_{el,p} + Q_{el,dod} + Q_V + Q_V$). Tato dvě pojetí vyrobené energie se vlastně liší ve stupni využitelnosti energie tepelné, neboť vyrobená el. energie je ve své podstatě využita vždy celá – ve svém přebytku je dodávána do rozvodné sítě.

Z obr. 7 tak můžeme vidět rozdíl mezi Q_{vyr} a $Q_{vyr,u}$. Zatímco Q_{vyr} je v otopném období o 1,5× větší než $Q_{vyr,u}$, v letním období je strmější nárůst Q_{vyr} oproti $Q_{vyr,u} - 3,1 \times$. Tento nepoměr je způsoben přerušením odběru tepla pro vytápění v letním období v případě $Q_{vyr,u}$, kdežto u Q_{vyr} je uvažováno, že veškeré odpadní teplo z chladiče Q_k je využito i v letním období.

Z výše analyzované energetické bilance a solárních ukazatelů ($f_{sol} a f_{sol,u}$) vyplývá i celková účinnost kogenerace η_{kog} a celková účinnost průměrné kogenerace $\eta_{kog,u}$ znázorněné na obr. 9. V případě otopného období je $\eta_{kog,o} = 73$ %, v případě letního je $\eta_{kog,j} = 71$ % a v případě celého roku je průměrná roční účinnost $\eta_{kog} = 72$ %. Učinnosti kogenerace se tedy v jednotlivých obdobích neliší, což potvrzuje efektivitu využití konvenčního zdroje energie, resp. plynového hořáku, v závislosti na potřebné el. a tepelné energii budovy.



Obr. 7 Graf celkové dodané energie do MJ a celkové vyrobené energie MJ za otopné (modře) a letní (fialově) období a celý rok (bíle)

Průměrná účinnost výroby el. energie η_{el} má podobnou tendenci: $\eta_{el,o}$ = 19 %, $\eta_{el,l}$ = 16 % a η_{el} = 18 %.

Reálná využitelnost vyrobené tepelné energie v simulovaném příkladu měla za následek uvedené snížení účinnosti kogenerace: o 1/3 během otopného období ($\eta_{kog,u,o}$ = 48 %) a celého roku ($\eta_{kog,u}$ = 41 %), a o 2/3 během letního období ($\eta_{kog,u,l}$ = 23 %). Snížení účinnosti kogenerace vzhledem k využitelnosti odpadního tepla během letního období, $\eta_{kog,u,h}$ je dáno velkými solárními zisky, které, vzhledem k simulovanému příkladu, nebyly a ani nemohly být využity. Z provedeného rozboru simulovaného příkladu tedy vyplývá, že by mělo vždy být prvotní snahou maximalizovat využití odpadního tepla.

Dle Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/28/ES dosahuje tento nový koncept hybridní MJ se SSM průměrný roční podíl OZE na výrobu el. energie a tepla až 27 %.

ZÁVĚR

Integrace matematického modelu MJ s hybridním SSM, vyvinutého v prostředí MATLAB, do simulačního prostředí TRNSYS, umožnila náhled na možný provoz MJ ve spojení s budovou, konkrétně s dvěma rodinnými domy.

Simulace prokázala, že hlavním kritériem pro efektivní provoz MJ s hybridním SSM, je maximální využití odpadního tepla. I přes efektivní regulaci výkonu plynového hořáku, umístěného v kolektoru SSM, je využitelná kogenerace méně účinná (průměrná roční účinnost využitelné kogenerace $\eta_{kog,u}$ = 41 %), a to především díky časovému nesouladu intenzity přímého slunečního záření s potřebou tepla na vytápění.

Je důležité připomenout, že nový koncept MJ byl vytvořen především za účelem efektivně přeměnit sluneční energii na energii elektrickou (který u prototypu Eurodish dosahuje až 22,5 %) s možností využití odpadního tepla produkovaného chladičem SSM. Simulovaný příklad ukázal, že průměrný roční podíl OZE (sluneční energie) na výrobě el. energie a tepla může dosáhnout až 27 %.

Mezi výhody tohoto nového konceptu patří především modularita (možnost využití ve vzdálených aplikacích bez energetických zdrojů při záměně zemního plynu zkapalněnými plyny), možnost využití různých zdrojů tepla a nízká hlučnost MJ (nedochází k výbuchům paliva uvnitř pracovních válců jako je tomu u klasických motorů s vnitřním spalováním). MJ tak nabízí velmi zajímavé řešení kombinované výroby elektřiny a tepla z OZE.



Obr. 8 Graf jednotlivých energií v celkovém modelu za otopné (modře) a letní (fialově) období a celý rok (bíle)

Tento článek vychází z výzkumného záměru MŠM 6840770011 Technika životního prostředí

Kontakt na autora: stepan.nosek@seznam.cz

Seznam použitých značek

- měrná tepelná kapacita [J.kg⁻¹.K⁻¹] С
- f podíl [-], [%]
- přirážka [-] р
- teplota [°C] t
- hmotnostní průtok [kg.s⁻¹] ṁ
- С tepelná kapacita průtoku [W/K]
- Ι intenzita záření [W.m⁻²]
- Ρ příkon [W]
- Q množství energie [J]
- Ò výkon, tepelný tok [W]
- S plocha [m²]
- Т termodynamická teplota [K]
- η účinnost [-]

Indexy

	V/ /1	<i>.</i>	
h	nrimoho	ZORON	ı
D	DITITICTIO	Zaicii	

- venkovní е
- i vstupující
- chladiče k
- 1

- Ζ
- dodaný dod
- elektrický el
- hořáku

- sol solární
- tepelný tep

- ztráty ztr
- В budovy



- п normálný
- vystupující, otopné období 0
- potřebný р
- studený, studené vody s
- и užitečný, využitý
- W vody
- zásobníku teplé vody
- hor
- konvenční konv
- mix přimíchaný
- otop otopná voda
- teplé vody tv
- vyr vyrobený
- vytápění vyt



Obr. 9 Graf provozních ukazatelů MJ pro otopné (modře) a letní (fialově) období a celý rok (bíle)

- V tepelného výměníku
- Ζ zásobníku teplé vody
- MJ mikrokogenerační jednotky
- SM Stirlingova motoru
- rozdíl Δ

Zkratky

- IAM - ideální adiabatický model
- MJ mikrokogenerační jednotka
- OS – otopná soustava
- OZE obnovitelný zdroj energie
- RD rodinný dům
- SM Stirlingův motor
- SSM Stirlingův solární motor

Použité zdroje:

- [1] Nosek, Š.: Mikrokogenerační jednotka s hybridním Stirlingovým solárním motorem, Vytápění, větrání, instalace, 2/2009, STP, Praha, p. 70-75.
- [2] TRNSYS - The Transient Energy System Simulation tool [online]. TESS -Thermal Energy Systems Specialists [cit. 31.7.2009].Dostupné na World Wide Web: <http://www.trnsys.com>.
- [3] TRNSYS Multizone Building modeling with Type 56 and TRNBuild, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 2005.
- [4] Kraut, R., Nevřiva P., Jarušková D.: Predikce v časových řadách spotřeb elektrické energie, ROBUST'2002, JČMF, 2002, p. 194-201.
- Nosek, Š.: Mikrokogenerační jednotka s hybridním Stirlingovým solárním mo-[5] torem, 2008, ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ú12116: Praha. p. 35.

* Jemný prach a vytápění dřevem

V současné době se věnuje veliká pozornost vytápění z hlediska ekologie. To se týká i otázky vytápění dřevem. Zde jsou velkým problémem emise jemného prachu. Ve srovnání s dieselovými dopravními prostředky je toto zanedbatelné, jak tvrdí mnozí výrobci kotlů na dřevo. Jemný prach pod 0,1 µm chová se podobně jako plyn a může tedy bez zábran vniknout do nervového systému, tedy nejen do dýchacích cest, a tím poškodit srdeční oběhový systém. V současnosti není známo, že by se obor vytápění zabýval tímto závažným tématem a měl by se vyjádřit i k jinak ekologickému vytápění dřevem*

CCI 07/2009

* Poznámka redakce:

Produkcí prachových částí při vytápění krbovou vložkou se zabýval příspěvek A. Hrušky ve VVI 3/2008, s. 138-140.

(Ku)