СТИРЛИНГОВ МОТОР ЗА ЕНЕРГЕТСКИ АУТОНОМНЕ СИСТЕМЕ КГХ – О НОВОЈ МЕТОДИ ИСПИТИВАЊА

STIRLING ENGINE FOR THE ENERGETIC AUTONOMOUS HVAC SYSTEMS – ABOUT A NEW TESTING METHOD

Тања Милашиновић, Рударски институт, Београд – Земун, и Марија Тодоровић, Лабораторија за термодинамику и термотехнику Пољопривредног факултета, Београд

Развојем коришћења обновљивих извора и децентрализованих система за производњу енергије, од пре нешто више од две деценије у жижи научно-технолошког интереса је Стирлингов мотор, чија је основа рада, укључујући и данас толико актуелан појам регенерације топлоте, дефинисана пуних осам година пре Карноовог процеса. Захваљујући вишегодишњем истраживању на плочастим Стирлинговим моторима, погоњеним топлотом ниске температуре, дошло се до идеје о новој методи испитивања степена искоришћења мотора, која се може применити за испитивање in situ и других врста мотора. Оваквом методом се тачно дефинишу места недовољно добре функције мотора, која би након овакве анализе требало даље усавршити. За процену термодинамичког степена искоришћења хт, ова метода захтева само податке о температури и pV–дијаграм. Ради се о комбинацији погона исп ог мотора као погонске термичке машине и као топлотне пумпе.

By the new renewable energy sources development and trends to spread decentralized energy production systems, attention has been drawn to the Stirling engine, the basis of which (icluding currently, so important concept of heat regeneration), has been defined eight years before the Carnot cycle. As a result of many years investigation of low temperature Stirling engine, the idea has been born about new method for thermodynamic efficiency determination, which could be applied for in situ testing of other types of engines as well. The new method feature is that engine points with "flow" quality can be recognized. To determine the thermodynamic efficiency η_t by this new method it is necessary to have only measurements data on temperatures and pV–diagram. Data have to be collected by the combination of machine operation – as a heat engine and a heat pump.

Кључне речи: *Стирлингов мотор; регенерација топлоте; термодинамички степен искоришћења; термичка машина*
Key words: *Stirling engine; heat regeneration; thermodynamic efficiency; heat engine*

1. Увод

Проблеми са енергијом постали су свакодневни (несташице, нестабилност на тржишту енергије, поремећаји у снабдевању и сл.). Због тога се јавља потреба за развојем виталног и еластичног система енергетике, у коме би децентрализована производња и аутономни енергетски системи могли да заузму значајно место, следећи на прикладан начин специфичне потребе

разноврсних потрошача на микро нивоу. Тако би се образовали аутономни системи малих потрошача као што су породичне куће, домаћинства, пољопривреда, индустрија или комерцијални објекти, у којима би се усклађивале потребе и потрошња електричне и топлотне енергије (осветљење, уређаји за климатизацију, грејање, хлађење, конзервација енергије). Према проценама холандских стручњака, у будућности би се потребе за електричном енергијом и топлотом једног таквог објекта добиле са свих расположивих кровних површина покривених фотонапонским и топлотним ПСЕ-има [1]. Према тим проценама, за потребе електричних апарата и кувања у домаћинству, уз одговарајућу уштеду енергије, потрошња би износила 1 530 kW/год., што би се подмирило са 22,5 m^2 фотонапонских пријемника. За потребе грејања објекта, уколико се примене све мере штедње енергије (дебља изолација зидова – 30 cm – низак губитак топлоте преко прозора к = 0,75 W/m^2K), утрошак енергије био би 8,4 GJ/год. Потребе за топлом водом такође износе 8,4 GJ/год. То би значило додатних 10 m^2 ПСЕ-а повезаних са сезонским складишником топлоте. За једно домаћинство, то укупно износи 32,5 m^2, што је много више од укупно расположиве површине крова на јужној страни.

Садашњи месечни трошкови фотонапонског система и термалног система су много већи од трошкова за електричну енергију. Међутим, у будућности би се ти трошкови, применом ове стратегије, смањили, јер би притисак тржишта довео до великих серија производње, а тиме до нижих цена и већих унапређења ових система. Развој нових технологија у свету, као што су комбинације Стирлинговог мотора са концентратором сунчеве енергије било би адекватно решење овакве стратегије у глобалном развоју енергетике.

Системи Стирлинг-концентратор демонстрирају највећу ефикасност претварања сунчевог зрачења у електричну енергију (приближно три пута већу од фотонапонског система). Последњих година развијено је и испитано више различитих прототипова ових система [2] и показало се да су за подручје потреба снаге од 10 до 100 kW и са садашњом ценом, конкурентнији од електрана на фосилна горива. Како се процењује, током следећих десет година доћи ће до пораста цена фосилних горива, па са тим у вези биће и све већа могућност примене ових система. За отварање ширења примене, важно је одређивање особина система у условима сличним стварним.

Имајући у виду стохастичан карактер сунчевог зрачења и климатских услова уопште, врло је тешко и готово немогуће симулирати стварне услове рада. Поставља се потреба за испитивањем in situ и самог Стирлинговог мотора. У том смислу може се користити нова метода за одређивање степена искоришћења мотора. Након дугогодишњег рада са нискотемпературним Стирлинговим моторима, у сврху испитивања је развијена метода за одређивање степена искоришћења мотора [7]. Испитивани мотори су лабораторијски модели врло мале снаге, што никако не би требало да одврати пажњу од методе за испитивање, која је по начину јединствена и даје пуну оцену рада свих елемената мотора. Њена предност је у универзалности и могућности широке примене и за друге, а не само Стирлингове моторе. На сличан начин се могу испитивати и високотемпературни Стир-

лингови мотори, који имају много већи степен искоришћења од нискотемпературних, а уграђени су у систем са концентратором сунчевог зрачења.

2. Стирлингов мотор

"Спороходни" плочасти Стирлингов мотор конструисан је за рад са процесном топлотом ниске температуре (100°C). Овај мотор има спољње сагоревање, па може користити и топлоту добијену из алтернативних извора: сунчеве енергије, отпадне индустријске топлоте, биогаса, топлоте добијене сагоревањем биомасе и сл. У случају соларне енергије, соларни коефицијент искоришћења се рачуна:

$$\eta_s = \eta_p \cdot \eta_t ,$$

а термичка ефикасност ПСЕ-а η_p, који испоручује топлотни флукс Q(T) при сунчевом зрачењу E_s:

$$\eta_p = \frac{Q(T)}{E_s}$$

Термодинамички степен искоришћења η_t пропорционалан је механичкој излазној снази (рад) W_M добијеној са улазном топлотом Q(T):

$$\eta_t = \frac{W_m}{Q(T)} .$$

Садашњу тешкоћу представља мерење η_t оваквих машина. Калориметријске методе за одређивање Q(T) нису биле баш успешне. При протоку флуида, који преноси топлоту, и на улазној и на излазној страни јављају се стални топлотни губици и увелико преовладавају наспрам малог дела, који се претвара у рад. Ово је типична особина нискотемпературних топлотних машина, које раде са малом температурском разликом $\Delta T = T_2 - T_1$. *Повратни* Стирлингов процес би показао најбољи η_t (исти као за Карноов кружни циклус [5, 8]):

$$\eta_t = \frac{W}{Q} = \frac{\Delta T}{T_2} .$$

Ако узмемо на пример једну разлику температура од $\Delta T = 60$ K и $T_2 = 360$ K, добија се највише W/Q = 1/6, што важи дакле за идеалан процес и пренос топлоте.

Информацију о η_t могуће је добити помоћу pV индикаторског дијаграма. На основу тога налазимо распон притиска Δp_i радног гаса између две изотермне фазе Стирлинговог циклуса. Δp_i је мера ефективног температурског распона ΔT_i између две изотерме у току циклуса $\Delta T_i / (T_2 - T_1)$ се може узети као горња процена односа η_t / η_t^*.

Међутим, стварна вредност η_t може бити још знатно нижа, него што је процењена вредност.

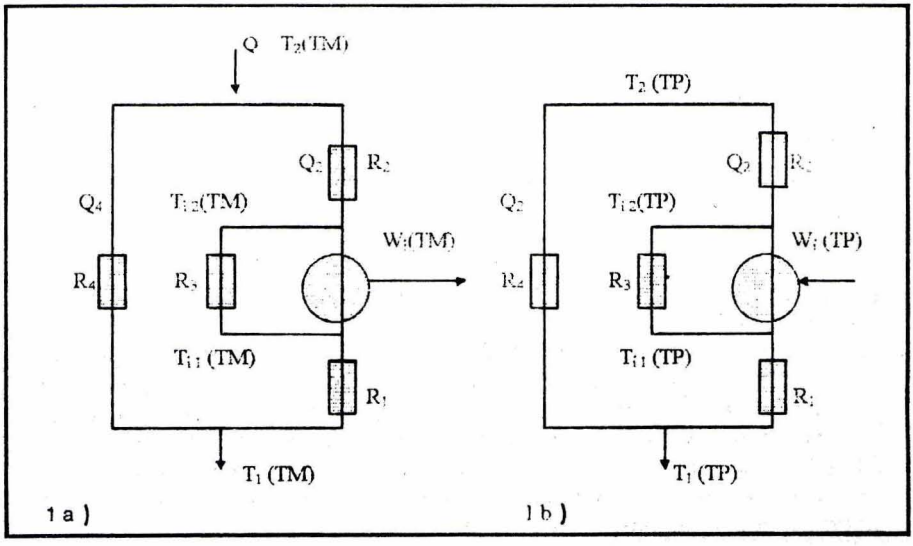
Један од разлога може бити слаб рад регенератора, или слаб механички

степен искоришћења η_m, који снижава индицирани рад W_i, на пример при трењу клипа или премештача, η_m се лако одреди путем односа излазног механичког рада W_m (нпр. мереног као сила кочења), наспрам индициране снаге W_i:

$$\eta_m = \frac{W_m}{W_i}$$

Комбинација погонске термичке машине и топлотне пумпе

У наставку следи извештај о методи налажења η_{it} без помоћи калориметрије. Она се заснива на погону Стирлинговог мотора прво као *погонске термичке машине (ТМ)* и онда као *топлотне пумпе (ТР)*. Коришћене су исте брзине обртаја за оба погона. За модел термичког погона, температуре су одржаване константним са термостатима T_1 (*ТМ*) и T_2 (*ТМ*). За модел топлотне пумпе хладна страна мотора одржавана је при T_1(*ТМ*), а друга топла страна је само добро термички изолована. Температура T_2(*ТР*) се мери у стационарном стању. За оба случаја снимљен је индикаторски дијаграм W_i(*ТМ*) и W_i(*ТР*), из којих је онда добијен распон температура ΔT_i(*ТМ*) и ΔT_i(*ТР*). На сликама 1а и 1б приказане су еквивалентне шеме циклуса коришћене за процену владајућих отпора преносу.



Слика 1. а) погонска термичка машина: нижа температура T_1(ТМ) и виша температура T_2(ТМ) одржавају се константним; одавани рад је W_i(ТМ), распон температура ΔT_i(ТМ) $=T_{i2}$(ТМ) – T_{i1}(ТМ); Q_2 и Q_4 се додају и чине укупни довод топлоте Q; б) топлотна пумпа: нижа температура T_1(ТР) се одржава константном, а горња температура T2(ТР) се одређује након успостављања стационарног стања

Уложени рад је $W_i(TP)$ и одговарајући температурски распон је $\Delta T_i(TP) = T_{i2}(TP) - T_{i1}(TP)$. Због структуралне симетрије код оба коришћена плочаста Стирлинговог мотора, узимамо да су отпори R_1 *и* R_2 једнаки, тј. $R_1 = R_2 = R$. Осам мерених величина $W_i(TM)$, $W_i(TP)$, $\Delta T_i(TM)$, $\Delta T_i(TP)$, $T_1(TM)$, $T_2(TM)$, $T_1(TP)$, $T_2(TP)$ је довољно за прорачун R, R_3, R_4, $T_{i1}(TM)$, $T_{i2}(TM)$, $T_{i1}(TP)$, $T_{i2}(TP)$ и η_{it}:

$$\eta_{it} = \frac{W_i(TM)}{Q_2 + Q_4} .$$

Ради упоређења рачунамо:

$$\eta_t^* = 1 - \frac{T_1(TM)}{T_2(TM)} .$$

и однос:

$$\varepsilon_i = \frac{\eta_{it}}{\eta_t^*}$$

што је показана ефикасност топлотне машине. Ово на крају множимо са механичким степеном искоришћења, да бисмо добили ефикасност претварања у механички рад:

$$\varepsilon = \varepsilon_i \cdot \eta_m$$

3. Експерименти – демонстрација примене методе

Испитивана су два типа плочастог Стирлинговог мотора:

1. конструкција према Рингбому (Walker at al, 1985) [6]. Покретни премештач/регенератор је направљен од порозног алуминијум-оксида (ERG, 1986) [3]. Пречник равне плоче је 20 cm. Запремина радног гаса $V_o = 628\ cm^3$. Запремина замаха клипа варира између 54 и 81 cm^3. Оптимална ротациона брзина је 4,5 Hz. Регенератор: 3 mm порозни алуминијум-оксид (ERG, 1986);
2. конструкција према Колину (1983), опремљена покретним премештачем/регенератором начињеним од врсте стиропора (стирофоам), уздужно прорезаног да би био пропустан за радни гас. Машина ради са дисконтинуираним кретањем премештача. Равне плоче су димензија 24 x 24 cm^2. Запремина радног гаса је $V_o = 1074\ cm^3$. Запремина замаха мембране је 71 cm^3. Оптимална ротациона брзина је 1,9 Hz. Регенератор: прорезани стирофоам 1 cm дебљине.

Оба мотора пуњена су ваздухом или хелијумом, као радним гасовима. У табелама 1 и 2 су излистане мерене вредности, а у табели 3 израчунате вредности R, R_3, R_4, η_{it}, ε_i и ε. Утврђени W_i редуцирани су на једнаке површине плоча дељењем са 0,0314 m^2 (1) и 0,0576 m^2 (2).

Табела 1. Термичка погонска машина: тачност мерења температуре ±0,01 K, показане снаге ±0,05 W/m², фреквенције ротације ±0,01 Hz, од η_m = ±0,01

Бр. екс. (*TM*)	Машина	Гас	ω	T_1(*TM*)	T_2 (*TM*)	ΔT_i(*TM*)	Wi(*TM*)	η_m
			Hz	K	K	K	W/m^2	
1	1	Ваздух	2,0	299	359	12,4	8,9	0,68
2			2,2	301	369	9,8	10,2	0,65
3			4,3	303	369	10,8	16,0	0,60
4			5,0	304	369	8,1	14,4	–
5	1	Хелијум	3,8	301	363	17,7	32,3	0,60
6			4,0	301	363	17,1	27,0	0,68
7			4,4	301	363	16,2	36,7	0,53
8			4,8	300	363	14,3	29,1	0,43
9	2	Ваздух	1,02	288	366	11,0	5,8	0,75
10			1,1	288	366	10,0	6,0	0,75
11			1,33	288	366	8,8	5,9	0,55
12	2	Хелијум	2,1	288	366	13,1	15,1	0,82

Табела 2. Топлотна пумпа: тачност мерења температуре ±0,01 K, измереног рада ±0,05 W/m², фреквенције обртања ±0,01 Hz

Бр. екс. (*TP*)	Машина	Гас	ω	T_1(*TP*)	T_2 (*TP*)	ΔT_i(*TP*)	Wi(*TP*)
			Hz	K	K	K	W/m^2
13	1	Ваздух	2,0	297	301,5	6,2	4,7
14			4,0	297	303,5	8,3	11,5
15			5,0	297	305,0	9,2	16,9
16	1	Хелијум	4,0	297	304,5	10,0	18,6
17			4,5	297	305,0	10,5	15,8
18			5,0	297	304,0	8,3	14,3
19	2	Ваздух	1,08	298	298,88	3,4	1,8
20			1,3	298	298,63	3,2	2,2
21	2	Хелијум	2,07	298	301,58	5,3	5,1

4. Разматрање

На примеру нискотемпературног Стирлинговог мотора, приказана је сва осетљивост ове методе испитивања, пошто је могуће одредити и врло мале вредности при конверзији топлоте. Метода омогућава дефинисање свих слабих тачака на мотору и правац даљег развоја и унапређења. Уводе се појмови отпора преносу топлоте, на основу којих је могуће проценити функцију свих елемената мотора. У даљем разматрању, на основу

Табела 3. Резултати: тачност R је $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ Km^2/W, а $\eta_{it} = \pm 0{,}05\%$

Бр. екс. (*TM-TP*)	Маш.	Гас	ω(TM)	ω(*TP*)	R	R_3	R_4	η_{it}	ε_i	ε
			Hz	Hz	10^{-4} K m^2 W^{-1}			%	%	%
1-13	1	Вазд	2,0	2,0	430	360	1600	0,95	5,6	3,9
2-13			2,2	2,0	515	380	1800	1,05	5,6	3,6
3-14			4,3	4,0	310	220	1800	1,20	6,6	3,9
4-15			5,0	5,0	320	190	2300	1,10	6,3	–
5-16	1	Не	3,8	4,0	180	235	800	1,50	8,8	5,3
6-16			4,0	4,0	185	210	930	1,35	7,8	5,3
7-17			4,4	4,5	185	280	1040	1,90	11,0	5,9
8-18			4,8	5,0	185	195	1370	1,55	8,8	3,8
9-19	2	Вазд	1,02	1,08	500	280	325	0,20	0,9	0,7
10-19			1,1	1,08	500	265	235	0,20	1,0	0,7
11-20			1,33	1,30	500	240	205	0,15	0,6	0,3
12-21	2	Не	2,1	2,07	300	250	940	0,85	4,0	3,3

испитивања је приказана анализа резултата експеримената.

Утврђени резултати испитивања у табели 3 показују изнимно ниску ефикасност ε_i конверзије топлоте у механички рад. Овакав резултат можемо предвидети независно од коришћеног модела са четири отпора из једне просте процене:

$$\varepsilon_1 < \frac{\Delta T_i(TM)}{\Delta T},$$

о којој је било речи у уводу рада. Нумерички исказано, добијамо ред величине:

$$\varepsilon_i < \frac{15\ K}{60\ K} \approx 25\%$$

Са садашњом детаљном анализом, у позицији смо да одредимо локацију и процесе, и где се губи највећа ексергија доведене топлоте.

А) Отпор преносу топлоте R

1/R контролише проток топлоте са топле или хладне плоче на радни гас. Табела 3 показује да 1/R расте са повећањем броја обртаја. Ово указује на повећан пренос топлоте са растућим турбуленцијама. Опадање вредности за рад $W_i(TM)$ при великом броју обртаја узроковано је техничким лимитом две испитане пилот-машине: премештач/регенератор је при брзим изменама топле и хладне стране непостојан. Ако уместо ваздуха користимо хелијум, пренос топлоте се већином удвостручује, јер хелијум показује за ред величине већи коефицијент провођења топлоте него ваздух.

R би требало бити што је могуће мање. То би захтевало проток гаса са великим турбуленцијама и плоче заобљене на крају са великим површинама преноса топлоте на и од радног гаса.

Однос $Q_2/W = T_2/\Delta T$ је реда 1 за комерцијалне високотемпературне Стирлингове моторе, али реда 10 за садашње нискотемпературне моторе. Ово илуструје важност малог R_1 и R_2, посебно у таквим нискотемпературним моторима.

Радни температурни интервал је:

$$\Delta T_i = (T_2 - RQ_2) - (T_1 - RQ_1) = \Delta T - RW_i$$

Ако је спољње ΔT већ мало, било какво његово смањење температурским губицима RW_i путем R_1 и R_2 према ΔT је погубно за резултујући степен искоришћења.

2. Отпори преносу топлоте R_3 и R_4

R_3 представља одступање од претпостављене идеалне машине (функција регенератора), а R_4 представља одвођење топлоте преко плоча које спајају топлу и хладну плочу (сл. 1). Они посебно мере ефикасност премештача-регенератора. Претпостављена су два различита отпора R_3 и R_4, само у сврху рачунања. У стварности, одвођење топлоте у нежељеном смеру ће се појавити свуда између топле и хладне температурске локације. Дакле, R_3 и R_4 би требало да су што је могуће већи.

Важност доброг рада регенератора постаје очигледна кад се постави однос топлоте Q_R ухваћене у једном идеалном регенератору наспрам рада оствареног у Стирлинговом циклусу:

$$\frac{Q_R}{W} \approx \left(\frac{R}{C_V}\right) \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) .$$

За случај ниских температура T_2/T_1 = 360 K/300 K, а са ваздухом $R/C_V = 2/5$ (однос гасне константе и топлотног капацитета гаса), добијамо:

$$\frac{Q_R}{W} \geq 10 .$$

Топлота размењена у регенератору је 10 пута већа од добијеног рада. Због тога, ниска ефикасност регенератора је велики недостатак за искоришћење топлоте у машини. У високотемпературској машини, на пример:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{2000\,K}{300\,K} \text{ постижемо } \frac{Q_R}{W} \approx 1 ,$$

што значи за ред величине мању осетљивост према лошој функцији регенератра. Ако погледамо бројне вредности R, R_3 и R_4, видимо садашње слабости два испитана демонстрациона модела нискотемпературних Стирлингових мотора: већином слаб пренос топлоте између радног гаса и

плоча (R је превелики) и исто тако слабу функцију регенератора (R_3 и R_4 су премали). Пошто у принципу односи:

$$\frac{Q_2}{W_i} \text{ и } \frac{Q_R}{W}$$

у оваквим нискотемпературним машинама имају велике вредности, осетљивост њиховог η_{it} према оваквом стању је сасвим разумљива.

Литература

[1] **Schaap, A. B., W. B. Veltkamp, J. van Berkel:** *Development of an energy matched single family house*, Kongres solarne energije, Budimpešta, 1993.

[2] **Schiel, W., T. Keck, J. Kern, A. Schweitzer:** *Long term testing of 9 kW dish/Stirling systems*, ASME International Solar Energy Conference, March 1994, San Francixso, CA, USA, 10 pages.

[3] ERG (1986): *Duocel, нови базични материјал*, Energy Research and Generation Inc., Lowell & 56th Street, Oakland, California 94608.

[4] **Kolin, L.:** *Isothermal Stirling-cycle engine*, Свеучилишна наклада *Либер*, Загреб, види Deutsches Patent DEô15 815 A 1, 1982.

[5] **Naso, V., A. Fiasco, M. di Meo, P. Sagretii and I. Kolin:** *Proceedings of 3rd International Stirling Engine Conference**, Rome, June 1986.

[6] **Walker, G. and J. R. Senft:** *Free piston Stirling engines,* Springer, Berlin and Heidelberg: vidi O. Ringbom Hot Air Engine – U.S. Patent No 856102, 1907.

[7] **Jung, D., T. Milašinović, R. Sizmann:** *Solar coefficient of performance of low temperature flat plate Stirling engines,* Proceedings of Solar World Congress, Kobe, septembar 1989, 6 stranica.

[8] **Rinia, H., F. K. du Prè:** *Heissluftmotoren,* Magazin "Philips Technische Rundschau", Eindhoven, Holandija, maj 1946.