

Tadeusz NOCH<sup>1</sup>

## UKŁAD KOGENERACYJNY PRZY WSPÓŁPRACY POMP CIEPŁA Z KOTŁOWNIĄ OLEJOWĄ I SIECIĄ CIEPŁOWNICZĄ

W niniejszym opracowaniu przedstawiono możliwość zastosowania układu kogeneracyjnego przy współpracy pomp ciepła z kotłownią olejową i siecią ciepłowniczą. W procesie badawczym objęto odzysk ciepła odpadowego z silnikiem Stirlinga. Odzyskane ciepło odpadowe ze spalin kotłowych zużyte jest do napędu silnika Stirlinga, który napędza prądnicę. Wykonano obliczenia bilansu energetycznego. Obliczone wartości średniej temperatury spalin  $T_{sr}$  i temperatury otoczenia  $T_{ot}$  pozwalają wyznaczyć aktualną sprawność silnika Stirlinga. Wykonany bilans energetyczny oszacowuje ilość możliwej do wytworzenia energii elektrycznej. Ilość ta jest mocno zróżnicowana dla różnych wartości zewnętrznej temperatury otoczenia. Opisano bilans energetyczny dla przypadku, gdy kotłownia sama w całości pokrywa zapotrzebowanie na ciepło. Scharakteryzowano współpracę kotłowni z pompami ciepła. Rozpatrzono pięć wariantów współpracy, wyznaczonych mocą cieplną zainstalowanych pomp ciepła. W każdym z tych wariantów inne są wartości wytworzonej mocy oraz energii elektrycznej z odzysku ciepła. Moc i energia elektryczna może być wykorzystana do napędu pomp ciepła, ewentualnie do pokrycia innych potrzeb. Przeprowadzono analizę wyników obliczeń dotyczących mocy i energii elektrycznej wytworzonych z odzysku ciepła odpadowego ze spalin kotłowych oraz mocy i energii elektrycznej potrzebnych do napędu pomp ciepła. Z analizy wyników obliczeń zawartych w tabeli 1 dotyczącej wytworzonej mocy i energii elektrycznej w sezonie grzewczym, wynika, że ogółem energia elektryczna z odzysku ciepła odpadowego ze spalin wynosi  $E_{el} = 18\,238,88$  kWh/a. Natomiast największa, uzyskana z odzysku ciepła odpadowego ze spalin, moc mechaniczna silnika Stirlinga jest równa  $N_{mstir} = 8,04$  kW. Wartość ta pozwala określić moc znamionową silnika do zastosowania w badanym obiekcie.

**Słowa kluczowe:** bilans energetyczny, silnik Stirlinga, odzysk ciepła, spaliny kotłowe, moc, energia, sprawność.

### 1. Wprowadzenie

Badaniem objęto zastosowanie silnika Stirlinga do wykorzystania ciepła odpadowego ze spalin w kotłowni GWSA w celu wytworzenia energii elektrycznej, która może być wykorzystana na potrzeby własne obiektów szkoły.

---

<sup>1</sup> Tadeusz Noch, Katedra Nauk Technicznych Gdańskiej Szkoły Wyższej, 80-656 Gdańsk, ul. Wydmy 3, tel. 602 130 709, e-mail: gsw@gsw.gda.pl

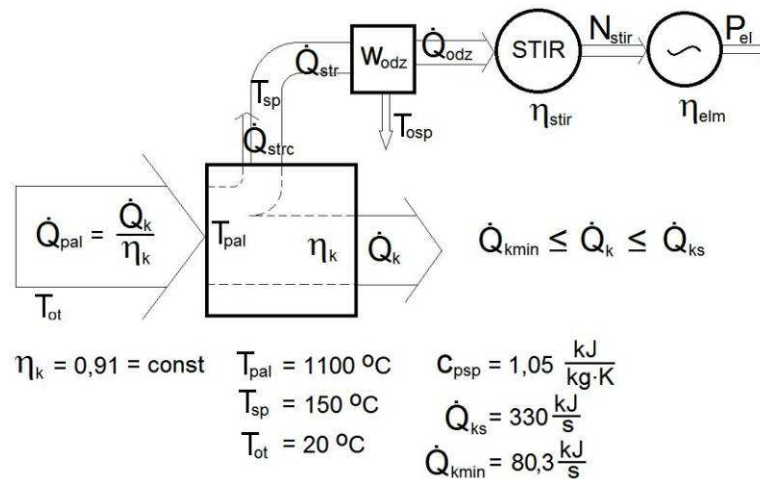
Jedną z koncepcji modernizacji układu ogrzewania pomieszczeń w budynkach jest zastosowanie pomp ciepła współpracujących z kotłownią i siecią ciepłowniczą. Energia elektryczna wytworzona za pośrednictwem silnika Stirlinga mogłaby zostać wykorzystana do napędu silników elektrycznych w pompach ciepła.

Wykonano bilans energetyczny instalacji wytwarzającej energię elektryczną uzyskaną z odzysku ciepła ze spalin kotłowych. W obliczeniach oszacowano możliwą do uzyskania moc silnika Stirlinga, moc elektryczną prądnicy oraz wytworzoną w sezonie grzewczym energię elektryczną. Podstawą do obliczeń jest obliczona w okresie grzewczym moc cieplna kotłowni: moc szczytowa i moc zmienna w czasie.

Dodatkowo w bilansie uwzględniono możliwość współpracy kotłowni z pompami ciepła w założonych wariantach współpracy. Do obliczeń wykorzystano, między innymi program symulacyjny współpracy kotłowni i lokalnej sieci ciepłowniczej z pompami ciepła, opisany w [1].

## 2. Odzysk ciepła odpadowego z silnikiem Stirlinga

W kotłowni GWSA pracują kotły wodne opalane olejem opałowym. Odzyskane ciepło odpadowe ze spalin kotłowych zużyte jest do napędu silnika Stirlinga, który napędza prądnicę. Schemat przepływów energetycznych przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat przepływów energetycznych w układzie produkcji energii elektrycznej z odzysku ciepła odpadowego ze spalin kotłowych z wykorzystaniem silnika Stirlinga

Fig. 1. Scheme of energy flows in the electricity production system based on waste heat recovery from boiler fumes using the Stirling engine

W dokonanych badaniach do sformułowanego algorytmu i do wykonanych obliczeń przyjmuje się opisane w opracowaniu poniższe założenia.

1. Moc cieplna kotła –  $\dot{Q}_k$  – zmienia się w zakresie wartości

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{kmin} &\leq \dot{Q}_k \leq \dot{Q}_{ks} \\ \dot{Q}_{ks} &= 330 \text{ kW}, \quad \dot{Q}_{kmin} = 82,5 \text{ kW} \end{aligned} \quad (1)$$

2. Sprawność kotła jest założona jako stała, niezależna od jego obciążenia cieplnego:

$$\eta_k = 0,91 = const \quad (2)$$

W kotłowni zainstalowane są kotły wodne Viessmanna opalane olejem opałowym. Sprawność kotłów zmienia się ze zmianą obciążenia, ale zmiany te są stosunkowo nieduże. Ilustracja zmian sprawności kotłów Viessmanna przedstawiono w publikacjach [2, 3]. Sprawności kotłów są wyższe, niż opisana powyżej przyjęta wartość do obliczeń. Założono taką sprawność na podstawie danych w katalogach GWSA [4], przyjmując dodatkowe założenie, że w trakcie eksploatacji pomiędzy przeglądami, sprawność tych kotłów będzie nieznacznie niższa od danych katalogowych.

3. Temperatura spalin w palenisku kotłowym jest równa:

$$T_{pal} = 1100^\circ\text{C} = const \quad (3)$$

Wartość tę przyjęto po przeanalizowaniu danych zawartych w publikacjach [2, 3].

4. W obliczeniach założono, że wysokotemperaturowy wymiennik silnika Stirlinga będzie zainstalowany w strumieniu spalin na wylocie z kotła, bez dokonywania jakichkolwiek zmian konstrukcyjnych w ciągu spalin w kotle. Podobnie jak w założeniu 3 przyjęto kolejne założenie dla uproszczenia algorytmu obliczeniowego, że temperatura spalin na wylocie z kotła –  $T_{sp}$  – jest stała, niezależna od cieplnego obciążenia kotła:

$$T_{sp} = 150^\circ\text{C} = const \quad (4)$$

5. Ciepło właściwe spalin jest równe  $c_{psp} = 1,05 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ .

6. Zewnętrzna temperatura otoczenia –  $T_{ot}$  – jest zmienna w sezonie grzewczym. Zakres tej zmienności wyznaczają: minimalna temperatura obliczeniowa dla pierwszej strefy klimatycznej – równa  $-16^\circ\text{C}$  oraz temperatura kończąca sezon grzewczy, której wartość wybrano  $12^\circ\text{C}$ :

$$-16^\circ\text{C} \leq T_{ot} \leq 12^\circ\text{C} \quad (5)$$

Poszczególne wartości temperatury z podanego zakresu zmienności mają w strefie klimatycznej Trójmiasta zadany czas trwania.

7. Stopień odzysku ciepła odpadowego ze spalin w wysokotemperaturowym wymienniku silnika Stirlinga:

$$w_{odz} = 0,8 = const \quad (6)$$

8. Sprawność silnika Stirlinga –  $\eta_{stir}$  – jest uzależniona od danych konstrukcyjnych silnika oraz od danych eksploatacyjnych: stopnia obciążenia silnika, a także od wartości temperatury gorącego i zimnego źródła, na których pracuje silnik.

W procesie odbioru ciepła wartość temperatury spalin w wymienniku ulega zmianie. Przyjęto, że temperatura gorącego źródła –  $T_{sr}$  – jest średnią arytmetyczną z wartości temperatury spalin na wlocie do wymiennika –  $T_{sp}$  i temperatury na wylocie z wymiennika –  $T_{osp}$ :

$$T_{sr} = \frac{T_{sp} + T_{osp}}{2} \quad (7)$$

Do obliczeń przyjęto dane konstrukcyjne silnika Stirlinga według informacji z literatury przedmiotu [5 oraz 6÷15].

- czynnikiem roboczym jest hel, dla którego wykładnik adiabaty przyjmuje wartość  $\kappa = 1,66$ ;
  - stopień sprężania w silniku założono  $\varepsilon = 20$ ;
  - stopień regeneracji ciepła w obiegu cieplnym silnika założono  $\rho = 0,7$ .
- Powyższe dane są włączone do przedstawionej niżej zależności opisującej sprawność silnika Stirlinga [5]:

$$\eta_{stir} = \frac{(\kappa - 1) \cdot (1 - c_x) \cdot \ln \varepsilon}{(\kappa - 1) \cdot \ln \varepsilon + (1 - c_x) \cdot (1 - \rho)} \quad (8)$$

gdzie:  $c_x = \frac{T_{ot} + 273,15}{T_{sr} + 273,15}$  ;

$T_{ot}$  – temperatura otoczenia, [°C];

$T_{sr}$  – średnia wartość temperatury spalin w wysokotemperaturowym wymienniku ciepła silnika, opisana wzorem (7), [°C];

$\varepsilon$  – stopień sprężania helu;

$\rho$  – stopień regeneracji ciepła w obiegu cieplnym silnika.

### 3. Obliczenia i wyniki obliczeń bilansu energetycznego

Kocioł wodny oddaje do lokalnej sieci ciepłowniczej moc cieplną –  $\dot{Q}_k$  – zmienną w czasie, zależną od zewnętrznej temperatury otoczenia w okresie sezonu grzewczego. Zgodnie z algorytmem obliczeń i wynikami obliczeń bilansu energetycznego [1] analizie poddano otrzymaną moc elektryczną  $P_{el}$  [kW] oraz wytworzoną energię elektryczną  $E_{el}$  [kWh/a]. Obliczone wartości średniej temperatury spalin  $T_{sr}$  i temperatury otoczenia  $T_{ot}$  pozwalają wyznaczyć aktualną sprawność silnika Stirlinga – według zależności (8). Moc mechaniczną silnika obliczono według wzoru:

$$N_{stir} = \dot{Q}_{odz} \cdot \eta_{stir} = \frac{w_{odz} \cdot u_{str} \cdot m \cdot \dot{Q}_{ks} \cdot (1 - \eta_k)}{\eta_k} \cdot \eta_{stir} \quad (9)$$

gdzie:

$u_{str}$  – udział strat ciepłych (mocy cieplnej) w spalinach w odniesieniu do całkowitych strat kotła – przyjęto:  $u_{str} = 0,98$ .

Moc elektryczna, przy założeniu sprawności elektromechanicznej prądnicy –  $\eta_{elm} = 0,95$ :

$$P_{el} = N_{stir} \cdot \eta_{elm} = \frac{w_{odz} \cdot u_{str} \cdot m \cdot \dot{Q}_{ks} \cdot (1 - \eta_k)}{\eta_k} \cdot \eta_{stir} \cdot \eta_{elm} \quad (10)$$

Powyższe zależności dotyczą jednej z wybranych wartości zewnętrznej temperatury otoczenia w sezonie grzewczym. Do obliczeń bilansu energetycznego przyjęto zmienność tej temperatury, jak pokazano w (5), a każda z tych wartości ma zadany czas trwania. Zewnętrzna temperatura otoczenia narzuca moc cieplną kotła –  $\dot{Q}_k$ , wynikającą z zapotrzebowania na ogrzewanie pomieszczeń. Moc cieplna kotła może być obliczana z wykorzystaniem chwilowego stopnia obciążenia – wskaźnika eksploatacyjnego szeroko stosowanego w energetyce. Moc cieplną kotła dla poszczególnych wartości temperatury otoczenia oraz wartości stopnia obciążenia uwzględniono w obliczeniach bilansu energetycznego. Wartości mocy cieplnej kotła i wartości chwilowego stopnia obciążenia cieplnego kotła dla zadanych wartości zewnętrznej temperatury otoczenia kształtują się następująco:

1. moc cieplna kotła  $\dot{Q}_k$  od 330 do 80 kW;
2. stopień obciążenia  $m$  od 1,0 do 0,243;
3. zewnętrzna temperatura otoczenia od  $T_{ot} = -16$  do  $12^\circ\text{C}$ .

W obliczeniach bilansu energetycznego wyróżnionych jest 29 przedziałów czasowych; w każdym z nich wytwarzana jest energia elektryczna. Całkowita ilość wytworzonej energii elektrycznej w sezonie grzewczym ostatecznie opisana jest wzorem:

$$E_{elc} = \sum_{j=1}^{29} E_{elj} = \sum_{j=1}^{29} P_{elj} \cdot \Delta\tau_j \quad (11)$$

gdzie wartość mocy –  $P_{elj}$  – w każdym z 29 przedziałów czasowych opisana jest wzorem (10). Końcowe wyniki obliczeń wytworzonej mocy elektrycznej i energii elektrycznej w sezonie grzewczym zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wytworzona moc i energia elektryczna w sezonie grzewczym

Table 1. Power and electricity created during the heating season

Temperatura otoczenia [°C]	Moc silnika Stirlinga $N_{stir}$ [kW]	Moc elektryczna z odzysku ciepła odpadowego ze spalin [kW]	Wytworzona energia elektryczna z odzysku ciepła odpadowego ze spalin [kWh/a]
-16	8,04	7,64	183,43
-15	7,77	7,38	177,16
-14	7,49	7,12	170,97
-13	7,23	6,87	164,84
-12	6,96	6,62	158,79
-11	6,70	6,37	152,81
-10	6,44	6,12	293,81
-9	6,18	5,88	352,67
-8	5,93	5,64	202,96
-7	5,68	5,40	388,85
-6	5,44	5,17	372,00
-5	5,19	4,94	473,82
-4	4,95	4,71	564,91
-3	4,72	4,48	645,50
-2	4,48	4,26	715,80
-1	4,25	4,04	776,03
0	4,02	3,83	1 010,06
1	3,80	3,61	1 127,32
2	3,58	3,40	1 225,24
3	3,36	3,20	1 380,98
4	3,15	2,99	1 508,50
5	2,94	2,79	1 943,55
6	2,73	2,59	1 183,28
7	2,53	2,40	806,54
8	2,32	2,21	583,17
9	2,13	2,02	484,94
10	1,93	1,84	440,47
11	1,74	1,65	396,73
12	1,56	1,47	363,73
$\Sigma =$			<b>18 238,88</b>

Z analizy wyników obliczeń zawartych w tabeli 1 dotyczącej wytworzonej mocy i energii elektrycznej w sezonie grzewczym, wynika, że ogółem energia elektryczna z odzysku ciepła odpadowego ze spalin wynosi  $E_{el} = 18\,238,88$  kWh/a. Z przeprowadzonych badań uzyskano istotne informacje w zastosowaniu praktycznym silnika Stirlinga.

1. Największa, uzyskana z odzysku ciepła odpadowego ze spalin, moc mechaniczna silnika Stirlinga jest równa  $N_{mstir} = 8,04$  kW. Ta wartość liczbową pozwala określić moc znamionową silnika Stirlinga, który można zamówić u wybranego producenta.
2. Silnik Stirlinga w zaproponowanym układzie ogrzewania pracuje na stosunkowo małych wartościach temperatury źródła gorącego. Uzyskanie znacznego odzysku ciepła ze spalin wymaga zastosowania wymiennika ciepła o stosunkowo dużej powierzchni wymiany ciepła.
3. Wykonany bilans energetyczny oszacowuje ilość możliwej do wytworzenia energii elektrycznej. Ilość ta jest mocno zróżnicowana dla różnych wartości zewnętrznej temperatury otoczenia. Zróżnicowanie to wynika z niżej opisanych powodów:
  - a) czas trwania poszczególnych wartości zewnętrznej temperatury otoczenia jest zróżnicowany. Najdłuższy czas trwania przypada dla temperatury  $T_{ot} = 5^{\circ}\text{C}$ ; jest to 696 godzin w roku i w tych warunkach, ze względu na czas trwania, jest największa produkcja energii elektrycznej (1 943 kWh/a). Drugi co do wielkości czas trwania – 504 godziny w roku przypada dla temperatury  $T_{ot} = 4^{\circ}\text{C}$  i tu oszacowana produkcja energii elektrycznej jest równa 1 508 kWh/a (tabela 1);
  - b) zmieniają się wartości temperatury źródła zimnego i źródła gorącego. Im większa jest ta różnica, tym jest lepsza sprawność silnika Stirlinga i, w rezultacie, tym lepszy stopień wykorzystania ciepła odpadowego ze spalin.
4. Złożenie czasu trwania poszczególnych wartości zewnętrznej temperatury otoczenia oraz oszacowanej produkcji energii elektrycznej może zasugerować przyjęcia poziomu odniesienia w projektowaniu urządzeń instalacji odzyskowej. Optymalny dobór urządzeń (na przykład powierzchnia wymiany ciepła i lokalizacja wymienników ciepła) przypadnie dla warunków panujących w temperaturze otoczenia  $T_{ot} = 5$  lub  $4^{\circ}\text{C}$ .

#### 4. Współpraca kotłowni z pompami ciepła

W opracowaniu opisano bilans energetyczny dla przypadku, gdy kotłownia sama w całości pokrywa zapotrzebowanie na ciepło. W badaniach nad modernizacją układu ogrzewania w GWSA uwzględnione są warianty współpracy kotłowni z pompami ciepła. W takich przypadkach część mocy cieplnej dostarczonej do odbiorcy przejmują pompy ciepła, a kotłownia pracuje zmniejszoną mocą cieplną. W rezultacie w kotłowni zmniejszone jest zapotrzebowanie na paliwo, zmniejszona jest ilość strat cieplnych w spalinach i w ostateczności zmniejszona jest ilość wytworzonej energii elektrycznej z odzysku ciepła odpadowego.

Rozpatrzono pięć wariantów współpracy, wyznaczonych mocą cieplną zainstalowanych pomp ciepła. Moc pompy ciepła:  $Q_{pc} = 13,5; 27; 40,5; 54$  i  $67,5$  kW. Natomiast w zestawieniu tabelarycznym zostały uwzględnione trzy warianty, tj. dla mocy pomp ciepła  $Q_{pc} = 13,5; 27$  i  $40,5$  kW.

W każdym z tych wariantów inne są wartości wytworzonej mocy oraz energii elektrycznej z odzysku ciepła. Moc i energia elektryczna może być wykorzystana do napędu pomp ciepła, ewentualnie do pokrycia innych potrzeb własnych GWSA. Wyniki obliczeń, wykonanych według opisanego wyżej algorytmu matematycznego oraz wykonanych z wykorzystaniem programu symulacyjnego [1], zestawiono w tabelach 2 i 3.

Tabela 2. Moc elektryczna wytworzona z odzysku ciepła odpadowego ze spalin kotłowych oraz moc elektryczna potrzebna do napędu pomp ciepła

Table 2. Electric power produced from the recovery of waste heat from boiler fumes and electric power necessary to propel a heat pump

Temperatura zewnętrzna otoczenia $t_{ot}$ [°C]	$Q_{PC} = 13,5 \text{ kW}$		$Q_{PC} = 27,0 \text{ kW}$		$Q_{PC} = 40,5 \text{ kW}$	
	Moc wytworzona [kW]	Moc potrzebna (wartość rzeczywista) [kW]	Moc wytworzona [kW]	Moc potrzebna (wartość rzeczywista) [kW]	Moc wytworzona [kW]	Moc potrzebna (wartość rzeczywista) [kW]
-16	7,33	3,85	7,02	7,88	6,70	12,09
-15	7,07	3,79	6,76	7,76	6,45	11,91
-14	6,82	3,74	6,51	7,65	6,20	11,74
-13	6,56	3,69	6,26	7,54	5,95	11,57
-12	6,31	3,64	6,01	7,44	5,71	11,41
-11	6,07	3,59	5,76	7,34	5,46	11,25
-10	5,82	3,54	5,52	7,22	5,22	11,07
-9	5,58	3,49	5,28	7,12	4,99	10,91
-8	5,34	3,44	5,05	7,02	4,75	10,74
-7	5,11	3,39	4,82	6,91	4,52	10,59
-6	4,88	3,34	4,59	6,82	4,30	10,44
-5	4,65	3,29	4,36	6,72	4,07	10,28
-4	4,42	3,24	4,14	6,61	3,85	10,12
-3	4,20	3,20	3,92	6,52	3,63	9,97
-2	3,98	3,15	3,70	6,41	3,42	9,81
-1	3,76	3,10	3,49	6,32	3,21	9,65
0	3,55	3,05	3,27	6,21	3,00	9,49
1	3,34	3,00	3,07	6,10	2,79	9,32
2	3,13	2,95	2,86	6,00	2,59	9,16
3	2,93	2,90	2,66	5,89	2,39	8,99
4	2,73	2,85	2,46	5,79	2,19	8,84
5	2,53	2,80	2,26	5,69	2,00	8,68
6	2,33	2,75	2,07	5,59	1,81	8,52
7	2,14	2,70	1,88	5,49	1,62	8,37
8	1,95	2,65	1,69	5,39	1,44	8,21
9	1,77	2,60	1,51	5,29	1,26	8,06
10	1,58	2,56	1,33	5,20	1,08	7,92
11	1,40	2,51	1,15	5,10	0,90	7,76
12	1,23	2,47	0,98	5,00	0,73	7,62



Tabela 3. Energia elektryczna wytworzona z odzysku ciepła odpadowego ze spalin kotłowych oraz energia elektryczna potrzebna do napędu pomp ciepła

Table 3. Electricity produced from the recovery of waste heat from boiler fumes and electricity necessary to propel a heat pump

Czas trwania zewnątrztempoty otoczenia [h/a]	Temperatura zewnątrztempoty otoczenia $T_{ot}$ [°C]	$Q_{PC} = 13,5$ kW		$Q_{PC} = 27,0$ kW		$Q_{PC} = 40,5$ kW	
		Energia wytworzona [kWh/a]	Energia potrzebna [kWh/a]	Energia wytworzona [kWh/a]	Energia potrzebna [kWh/a]	Energia wytworzona [kWh/a]	Energia potrzebna [kWh/a]
24	-16	176	92	168	189	161	290
24	-15	170	91	162	186	155	286
24	-14	164	90	156	184	149	282
24	-13	158	89	150	181	143	278
24	-12	152	87	144	179	137	274
24	-11	146	86	138	176	131	270
48	-10	279	170	265	347	251	531
60	-9	335	209	317	427	299	654
36	-8	192	124	182	253	171	387
72	-7	368	244	347	498	326	762
72	-6	351	241	330	491	309	751
96	-5	446	316	419	645	391	986
120	-4	531	389	497	794	462	1 214
144	-3	605	460	564	938	523	1 435
168	-2	669	529	622	1 078	574	1 647
192	-1	723	595	669	1 213	616	1 853
264	0	937	805	864	1 639	792	2 504
312	1	1 042	935	957	1 904	871	2 908
360	2	1 128	1 061	1 030	2 159	932	3 297
432	3	1 265	1 251	1 149	2 545	1 033	3 885
504	4	1 374	1 435	1 240	2 919	1 106	4 455
696	5	1 760	1 947	1 576	3 959	1 392	6 039
456	6	1 064	1 254	944	2 548	825	3 886
336	7	719	907	632	1 844	545	2 881
264	8	515	700	447	1 422	379	2 168
240	9	424	625	363	1 270	301	1 934
240	10	380	615	319	1 248	259	1 901
240	11	337	603	277	1 223	217	1 863
240	12	294	592	235	1 201	175	1 828
<b><math>\Sigma =</math></b>		<b>16 701</b>	<b>16 542</b>	<b>15 164</b>	<b>33 659</b>	<b>13 626</b>	<b>51 379</b>
		<b><math>U_{ePC} = 1,010</math></b>		<b><math>U_{ePC} = 0,451</math></b>		<b><math>U_{ePC} = 0,265</math></b>	

gdzie:  $U_{ePC}$  – udział energii elektr. wytworzonej w sezonie grzewczym z odzysku ciepła odpadowego w pokryciu zapotrzebowania do napędu pomp ciepła.

Dla każdego wariantu współpracy kotłowni z pompami ciepła obliczono moc i energię elektryczną wytworzoną z odzysku ciepła za pośrednictwem silnika Stirlinga (w tabelach: kolumny zatytułowane: „Moc wytworzona” i „Energia wytworzona”) oraz rzeczywistą moc i energię elektryczną potrzebną do napędu pomp ciepła (w tabelach: kolumny zatytułowane: „Moc potrzebna. Wartość rzeczywista” i „Energia potrzebna”). Obliczenia są wykonane dla całego zbioru wartości zewnętrznej temperatury otoczenia.

## 5. Podsumowanie

Analizując wyniki obliczeń zestawione w tabeli 2 i 3 dotyczących odpowiednio mocy i energii elektrycznej wytworzonych z odzysku ciepła odpadowego ze spalin kotłowych oraz mocy i energii elektrycznej potrzebnych do napędu pomp ciepła stwierdzono, że występują pewne zależności badanych parametrów technicznych. Porównując ich wielkości można scharakteryzować efektywność wariantów obliczeniowych z uwzględnieniem wykorzystania silnika Stirlinga.

1. Wzrost mocy zainstalowanej pomp ciepła powoduje:
  - a) wzrost mocy elektrycznej oraz wzrost energii elektrycznej zużytej do napędu pomp ciepła;
  - b) obniżenie wytworzonej mocy i energii elektrycznej uzyskanej z odzysku ciepła odpadowego.
2. We wszystkich wariantach obliczeniowych udział energii elektrycznej do napędu pomp ciepła, wytworzonej z odzysku ciepła odpadowego, liczony dla całego sezonu grzewczego, jest mniejszy od jedności. Wniosek jest taki, że do napędu pomp ciepła konieczny jest pobór energii elektrycznej z systemu elektroenergetycznego przez cały sezon grzewczy, a w wariantcie z pompami ciepła o mocy zainstalowanej 13,5 kW – przez część sezonu grzewczego. Udziały energii elektrycznej maleją ze wzrostem mocy zainstalowanej pomp ciepła.
3. W wariantcie współpracy kotłowni, w którym moc zainstalowana pomp ciepła jest równa 13,5 kW, w części sezonu grzewczego, w której zewnętrzna temperatura otoczenia jest nie wyższa niż 3°C, wytworzona moc elektryczna z odzysku ciepła odpadowego jest większa niż moc zapotrzebowana do napędu pomp ciepła. Występuje tu nadwyżka wytworzonej mocy i energii elektrycznej, którą będą zasilane inne odbiorniki energii elektrycznej w GWSA. Gdy zewnętrzna temperatura otoczenia jest wyższa od 3°C, wytworzona moc i energia elektryczna jest mniejsza od zapotrzebowanej do napędu pomp ciepła. Konieczny jest wówczas pobór energii z sieci elektroenergetycznej.
4. W wariantach współpracy o mocy zainstalowanej pomp ciepła równej 27,0 kW i większej wytworzona moc i energia elektryczna z odzysku ciepła odpadowego jest mniejsza od wartości zapotrzebowanych w całym sezonie grzewczym. Różnice pomiędzy mocą i energią wytworzoną a zapotrzebowaną wzrastają ze wzrostem zainstalowanej mocy pomp ciepła.

Przedstawiona problematyka układu kogeneracyjnego przy współpracy pomp ciepła z kotłownią olejową i siecią ciepłowniczą ma istotny wpływ na uwarunkowania ekonomiczne i ekologiczne. Do rozwoju nowych technologii wdrażanych w energetyce cieplnej uwzględniane są również źródła energii odnawialnej. Zastosowanie układu kogeneracyjnego ma szczególne znaczenie w systemach ciepłowniczych.

## Literatura

- [1] Kusto Z.: Uwarunkowania ekonomicznej efektywności pomp ciepła, Wyd. IMP PAN, Gdańsk 2006.
- [2] INSTAL-ROGRA. Technika Grzewcza i Sanitarna; <http://www.instalrogra.pl/index.php?page=produkty&kat=Viessmann>, listopad 2011.
- [3] Viessmann. Climate of innovation; <http://www.viessmann.pl/pl/service/itemap.html>, <http://www.viessmann.pl/pl/obiekty-przemyslowe/systemy-grzewcze.html>, [http://www.viessmann.pl/pl/dom\\_wielorodziny/systemy-grzewcze/kotly-olejowe.html](http://www.viessmann.pl/pl/dom_wielorodziny/systemy-grzewcze/kotly-olejowe.html), listopad 2011.
- [4] Wytyczne projektowe: Paromat, Turbomat und Vitoplus Abgas/Wasser-Warmetauscher. VIESSMANN. 5811 046-4, 2/2000.
- [5] Żmudzki S.: Silniki Stirlinga. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1993.
- [6] American Stirling Company; <http://www.stirlingengine.com/fullpower>, <http://stirlingengine.com/links>, sierpień-październik 2011.
- [7] Backhaus S., Swift G.: New varieties of thermoacoustic engines. LA-UR-02-2721, 9th International Congress on Sound and Vibration, Los Alamos NM 87545, July 2002.
- [8] Dancette M., Wintrebert G.: Etude et realisation d'un modele sur table de moteur Stiring de 3 kW scelle a sortie electrique. Raport Final. Commission des Communautés Européennes. EUR 9444 FR, 1984.
- [9] Micro-Cooling, Heating, and Power (m-CHP) Instructional Module. United States Department of Energy (DOE), Mississippi Cooling, Heating, and Power (micro-CHP) and Bio-fuel Center. Mississippi State, MS 39762. December 2005.
- [10] Stirling DK; <http://www.stirling.dk>, wrzesień-listopad 2011.
- [11] Stirling Leistungsmotoren; <http://www.stirlingmotor.com/leistungsmot.html>, październik 2011.
- [12] Stirling Technology Inc; <http://www.stirling-tech.com>, listopad 2011.
- [13] Technische Dokumentation SOLO STIRLING 161 microKWK-Modul. Version 1.9 für Planer. SOLO STIRLING GmbH, Sindelfingen Juli 2003.
- [14] Thomas B.: Application of internal wave form heat exchangers to Stirling engines. Stirling-Engineering Karl Kocsisek. Reutlingen 29.07.05.
- [15] Tyagi S.K., Kaushik S.C., Singhal M.K.: Parametric study of irreversible Stirling and Ericsson cryogenic refrigeration cycles. Energy Conversion and Management 43 (2002) 2297-2309.

## CHP SYSTEM COMBINING HEAT PUMPS, OIL BOILER AND HEATING NETWORK

### Summary

The article presents applicability of CHP system combining heat pumps, oil boilers and heating network. The research includes waste heat recovery by means of the Stirling engine. Recovered waste heat is used to propel Stirling engine, which propels a generator of electricity. Energy balance was calculated. Calculating average temperature of fumes  $T_{sr}$  and ambient temperature  $T_{ot}$  allowed to find actual efficiency of the Stirling engine. Calculated energy balance estimates the amount of electricity which is possible to generate. This amount varies significantly depending on the ambient temperature. In this case the energy balance is calculated for the situation in which a boiler is able on its own to fully cover the demand of heat. The cooperation between boilers and heat pumps was characterized. Five different variants of cooperation were considered, in each variant a heat pump has a different power. In each variant different parameters of electric power and energy from recovered heat were obtained. The energy produced in this way can be used either to propel the heat pump or to cover other needs. The author conducted the analysis of calculation results concerning the electric power and energy produced from the recovered waste heat from boiler fumes as well as electric power and energy necessary to propel heat pumps. The results of the analysis (Table 1) concerning the electric power and energy produced during a heating season show that the general electric energy obtained from the recovered waste heat from boiler fumes is  $E_{el} = 18\,238,88$  kWh/a. Moreover, the highest mechanic power of the Stirling engine, obtained from the waste heat from the fumes is  $N_{mstir} = 8,04$  kW.

**Keywords:** energy balance, Stirling engine, heat recovery, boiler fumes, power, energy.

*Przesłano do redakcji: 09.04.2015 r.*

*Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.*

DOI:10.7862/rb.2015.62