

Adam ADAMIEC, Andrzej JAESCHKE
Politechnika Łódzka
Studenckie Koło Energetyków Politechniki Łódzkiej
Instytut Maszyn Przepływowych
e-mail: andrzej.jaeschke@gmail.com
nr tel.: +48 694 146 021

METODY ODZYSKIWANIA CIEPŁA ODPADOWEGO. PORÓWNANIE OBIEGU ORC I SILNIKA STIRLINGA

Streszczenie: Ogromne ilości ciepła są wyrzucane do środowiska, jako odpady z procesów produkcyjnych. W toku wieloletnich badań wynaleziono kilka sposobów odzysku tego ciepła i jego zamiany na energię elektryczną. W niniejszym artykule porównane są dwie z nich: obieg ORC i silnik Stirlinga. Obieg ORC zyskuje coraz szersze zastosowania w energetyce, podczas gdy silnik Stirlinga jest technologią mało znaną. Obieg ORC ma zastosowanie przy siłowniach większej mocy, zaś silnik Stirlinga jest bardziej odpowiedni dla energetyki rozproszonej.

Słowa kluczowe: silnik Stirlinga, organiczny obieg Rankine'a (ORC), porównanie, ciepło odpadowe.

METHODS OF WASTE HEAT RECOVERY. COMPARISON OF ORGANIC RANKINE CYCLE AND STIRLING ENGINE

Abstract: Huge amount of heat is dumped into environment as a waste of production processes. During years of research few technologies of recovery of this heat and converting it into electric energy were invented. This paper is focused on comparison of two of them: the Organic Rankine Cycle and the Stirling engine. Although ORC has more and more applications in energetics, the Stirling engine is not well known. ORC can be applied to power plants of higher power, the Stirling engine, on the other hand, is more suitable for distributed generation.

Keywords: engine Stirling, Organic Rankine Cycle (ORC), comparison, waste heat.

1. WSTĘP

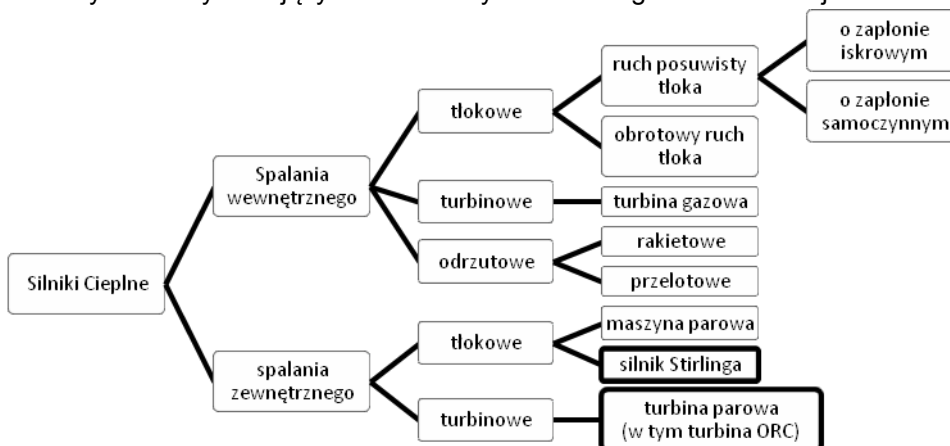
W dzisiejszych czasach rosnące zapotrzebowanie na energię oraz stale podnoszone wymagania odnośnie emisji substancji szkodliwych dla środowiska stanowią istotne wyzwania dla przemysłu energetycznego. Z drugiej strony

ludzkość wykorzystuje jedynie niewielką część produkowanej przez siebie energii, znaczna część oddawana jest do środowiska w postaci gorących gazów i/lub gorącej wody, innymi słowy płynów niosących znaczne ilości ciepła odpadowego. Wiele zakładów produkcyjnych stosuje wodę do chłodzenia elementów wykorzystywanych w procesach produkcyjnych (np. elektrownie, przemysł stalowy) i w wielu wypadkach woda ta trafia do otoczenia, często mając temperaturę, która zaburza równowagę biologiczną w lokalnych ekosystemach. Układy służące do odzyskiwania ciepła odpadowego przynoszą dodatkowy zysk energetyczny i zmniejszają negatywny wpływ przemysłu na środowisko. Na rynku energetycznym pojawia się coraz więcej firm specjalizujących się w tworzeniu zespołów służących odzyskiwaniu ciepła odpadowego.

W niniejszym referacie porównane zostaną dwie metody odzysku ciepła odpadowego: z użyciem obiegu ORC (Organic Rankine Cycle) i silnika Stirlinga.

2. KLASYFIKACJA SILNIKÓW CIEPLNYCH

Wieloletni rozwój maszyn, które miały na celu wyeliminowanie siły ludzkich mięśni jako źródła energii mechanicznej, zaowocował wielorakością rozwiązań konstrukcyjnych urządzeń, które pozyskują ową energię ze źródeł takich jak nurt rzeczny, wiatr czy energia cieplna uzyskana w procesie spalania biomasy lub paliw kopalnych. Rysunek 1 ukazuje generalny podział silników cieplnych. Obydwa porównywane silniki cieplne należą do grupy silników spalania zewnętrznego, co oznacza, że energia termiczna (cieplna) dostarczana jest do czynnika roboczego z zewnątrz. Kolejny podział rozróżnia wyżej wymienione maszyny na tłokowe oraz turbinowe. Zarówno w silniku Stirlinga jak i w obiegu ORC stała ilość czynnika roboczego podawana jest różnym przemianom termodynamicznym mającym na celu uzyskanie energii mechanicznej.



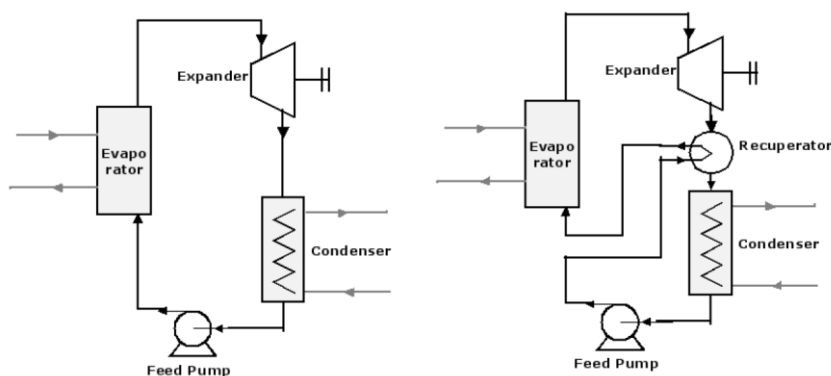
Rys. 1. Podział silników cieplnych [źródło własne]

Fig. 1. Classification of heat engines

3. OBIEG ORC

Pierwsze zastosowania obiegów ORC (ang. Organic Rankine Cycle) miały miejsce w latach 70. ubiegłego wieku. Od tego czasu poczyniono liczne optymalizacje. W chwili obecnej na świecie funkcjonuje wiele elektrowni wykorzystujących tę technologię.

Zasada działania Organicznego Obiegu Rankine'a jest analogiczna do obiegu Rankine'a z tą różnicą, że ORC pracuje z czynnikiem organicznym, a nie, jak obieg Rankine'a, z parą wodną. W obiegach ORC używa się czynników organicznych o temperaturze wrzenia niższej od temperatury wrzenia wody, które nazywane są czynnikami niskowrzącymi. Czynnik wykorzystywany w obiegu musi mieć temperaturę wrzenia niższą od temperatury źródła górnego, a temperatura skraplania w danych warunkach musi być wyższa od temperatury źródła dolnego [1].



Rys. 2. a) Obieg ORC b) Obieg ORC z rekuperatorem [1]

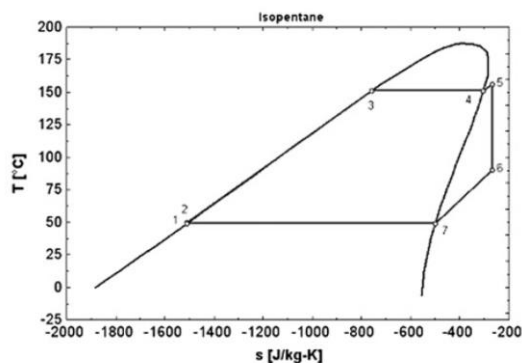
Fig. 2. a) Organic Rankine Cycle b) ORC with recuperator [1]

W parowniku dzięki wymiennikowi ciepła z górnym źródłem, czynnik roboczy jest podgrzewany, odparowywany i w części obiegów przegrzewany. Następnie czynnik o podwyższonych parametrach (ciśnienie, temperatura) oddaje energię rozprężając się w turbinie, generując w ten sposób energię mechaniczną, zamienianą następnie na energię elektryczną. Zadaniem dolnego źródła ciepła jest schłodzenie i skroplenie przy stałym ciśnieniu pary wykorzystanej w turbinie. Zadanie to realizuje się w wymienniku ciepła, który pełni rolę skraplacza. Źródłem dolnym może być na przykład woda o temperaturze niższej niż temperatura skraplania czynnika roboczego. Następnie, przy użyciu pompy wymusza się przepływ czynnika w kierunku wymiennika górnego źródła i cykl powtarza się. Przebieg całego procesu graficznie przedstawia rys. 2a. W przypadku obiegu ORC temperatura ośrodka gorącego jest znacznie niższa niż w przypadku obiegu dla pary wodnej (obiegu Rankine'a). Teoretyczny organiczny obieg Rankine'a składa się z następujących przemian [2, 3]:

- izentropowego rozprężania w turbinie,
- izobarycznego skraplania w skraplaczu (wymienniku dolnego źródła ciepła),
- izochorycznego pompowania kondensatu,
- izobarycznego podgrzewania i odparowania czynnika (w wymienniku górnego źródła ciepła).

Teoretyczny Organiczny Obieg Rankine'a został przedstawiony na wykresie T-s na rys. 3.

W obiegu rzeczywistym przedstawione przemiany przebiegają w sposób nieidealny i wiążące się z nimi straty energii powodują spadek sprawności silnika.



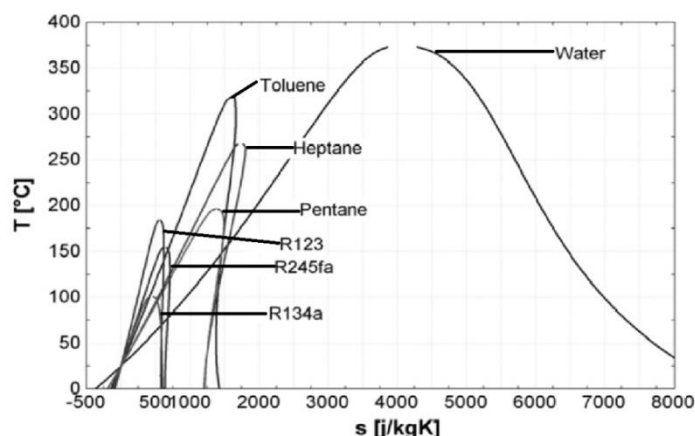
Rys. 3. Teoretyczny obieg ORC dla izopentanu jako czynnika roboczego [4]

Fig. 3. Theoretical Organic Rankine Cycle for isopentane [4]

W ciągu ostatnich 30 lat trwają ciągłe prace nad podniesieniem sprawności obiegu ORC. Jednym z ich efektów jest Organiczny Obieg Rankine'a z rekuperatorem. W silniku opartym na tym rozwiązaniu wymiennik odzyskuje ciepło z czynnika między turbiną a skraplaczem i oddaje je czynnikowi między pompą, a parownikiem (rys. 2b). Rozwiązanie to znacznie podnosi sprawność obiegu [1].

W przypadku obiegu ORC szczególnie istotne dla sprawności jest odpowiednie dobranie czynnika roboczego do danego zastosowania. Istnieje bardzo wiele czynników roboczych używanych w obiegach ORC. Charakterystyki przykładowych czynników roboczych przedstawione są na wykresie T-s na rys. 4 (wraz z wykresem dla wody, dla porównania). Istotna przy doborze czynnika roboczego jest również stabilność chemiczna przy najwyższej temperaturze w obiegu. Wadą większości czynników ORC jest ich szkodliwy wpływ na środowisko i podzespoły realizujące obieg.

Silniki oparte na obiegu ORC, jako silniki spalania zewnętrznego o obiegu zamkniętym, znajdują szereg zastosowań przy generacji i kogeneracji energii elektrycznej. Do najczęstszych zastosowań należą: zastosowania geotermalne, wykorzystanie ciepła odpadowego oraz termiczne elektrownie słoneczne.



Rys. 4. Diagram T-s dla przykładowych czynników ORC i wody [4]

Fig. 4. T-s diagram for exemplary ORC fluids and water [4]

Układy ORC są szeroko wykorzystywane w energetyce, coraz częściej także do odzysku ciepła odpadowego. Przykładem istniejącego zastosowania komercyjnego jest instalacja ORC w zakładach energetycznych miasta Kempen (Niemcy). Zastosowano tam agregat Turboden 6 HR o wyjściowej mocy elektrycznej 528 kW. Temperatury górnego i dolnego źródła to odpowiednio: 310°C i 85°C. Sprawność ogólna obiegu wynosi: 17,6% [5].

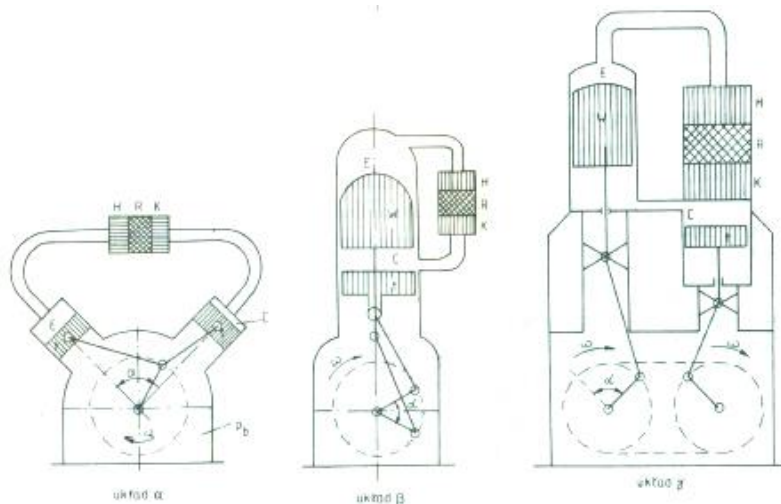
4. SILNIK STIRLINGA

Silnik Stirlinga wynaleziono i opatentowano w pierwszej połowie XIX wieku. Początkowo miał konkurować z maszyną parową, lecz po przegranej ze względu na technologie wykonania, używane ówczesne materiały oraz konieczność rozruchu został zapomniany aż do połowy XX wieku. Wtedy zaczęto interesować się wysokosprawnymi technologiami pozyskiwania energii mechanicznej oraz unikalnymi właściwościami eksploatacyjnymi.

Silnik Stirlinga to tłokowy silnik cieplny spalania zewnętrznego. Charakteryzuje się zamkniętym obiegiem czynnika roboczego, do którego cyklicznie dostarczane i odprowadzane jest ciepło. Dzięki możliwości dostarczania ciepła z zewnątrz do czynnika roboczego możliwe jest zasilanie ciepłem z dowolnego źródła, np.: energią słoneczną, wód geotermalnych, czy energią odpadową pochodzącą z procesów technologicznych [6,7,8].

W literaturze [6] rozróżnia się trzy podstawowe typy silników Stirlinga ze względu na ich budowę: alfa, beta i gamma. W podstawowej konfiguracji silnik typu alfa składa się z dwóch cylindrów o różnej temperaturze (ciepłego oraz zimnego). Są one połączone ze sobą zasobnikiem ciepła zwanym regeneratorem. W cylindrach poruszają się tłoki sprzęgnięte układem korbowym

pozwalającym realizować wyprzedzenie cyklu ruchu tłoka w cylindrze ciepłym o około $\frac{1}{4}$ w stosunku do tłoka w cylindrze zimnym (rys. 5).

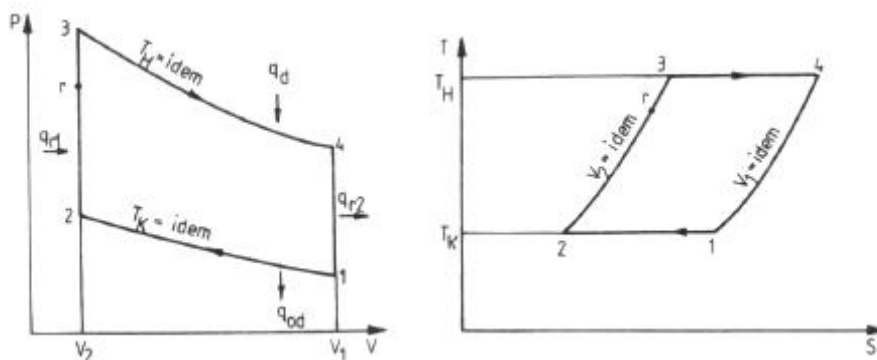


Rys. 5. Schemat budowy silnika Stirlinga typu alfa, beta i gamma [6]

Fig. 5. Schema of the alpha, beta and gamma Stirling engine types [6]

W silnikach typu beta i gamma wyróżnia się dwa podstawowe elementy: tłok roboczy oraz wypornik. Wypornik W pełni rolę elementu mającego na celu przemieszczanie czynnika roboczego pomiędzy przestrzeniami, w których dochodzi do wymiany ciepła (rys. 5). Ponadto istnieje wiele klasyfikacji silników Stirlinga, między innymi ze względu na różnice konstrukcyjne.

Obiegiem teoretycznym dla tego silnika jest obieg Stirlinga, składa się on z czterech kolejnych przemian: 1-2 sprężania izotermicznego, 2-3 izochorycznego ogrzewania, 3-4 izotermicznego rozprężania oraz 4-1 izochorycznego rozprężania (rys. 6).

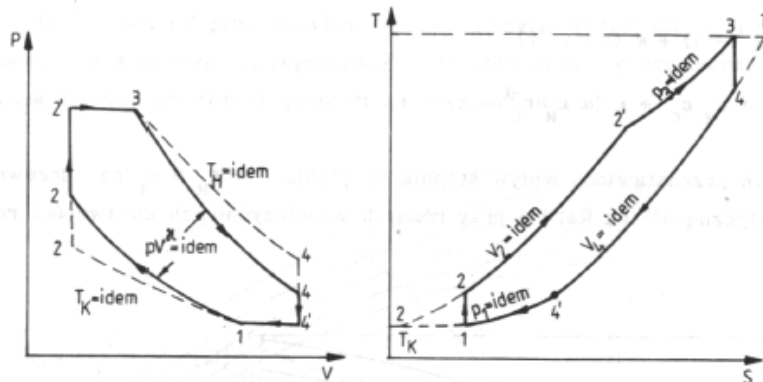


Rys. 6. Obieg Stirlinga [6]

Fig. 6. Stirling cycle [6]

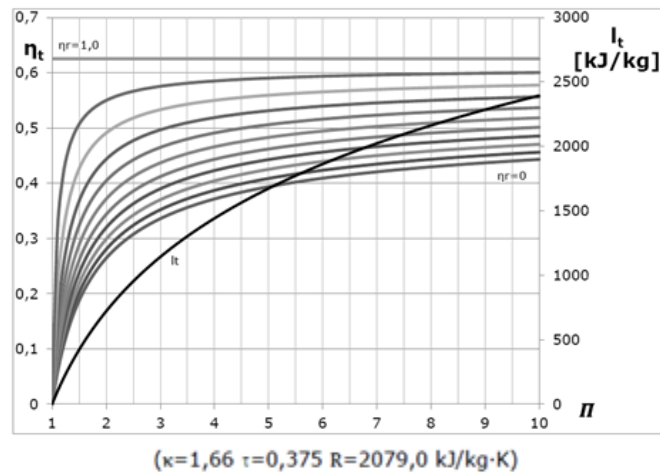
Obieg Stirlinga tworzą dwie izotermi i dwie izochory, co czyni go najbardziej zbliżonym ze znanych, do obiegu Carnota.

Analiza parametrów termodynamicznych gazu roboczego w zbudowanych dotąd silnikach cieplnych wykazała brak możliwości technicznej realizacji Obiegu Stirlinga, przede wszystkim ze względu na ciągły ruch elementów silnika. Za obieg porównawczy dla silników Stirlinga przyjętą można obieg Rallisa, który w odróżnieniu od obiegu Stirlinga składa się z sześciu przemian, gdzie regeneracja ciepła odbywa się w czasie realizacji przemian izochorycznej oraz izobarycznej (rys. 7).



Rys. 7. Obieg Rallisa [6]

Fig. 7. Rallis cycle [6]

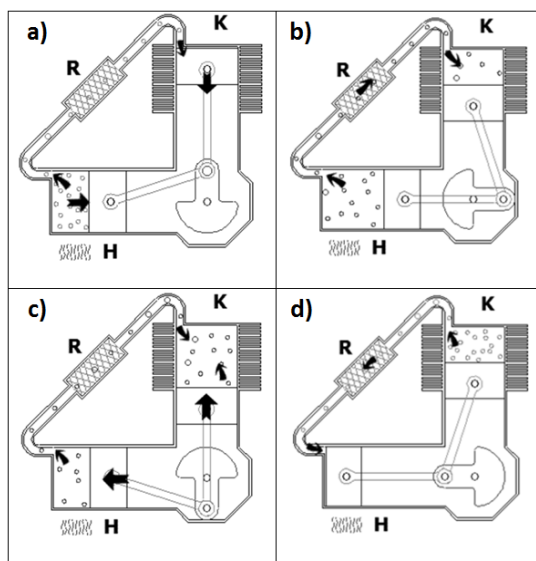


Rys. 8. Wpływ stopnia sprężania na sprawność oraz jednostkową pracę teoretyczną obiegu Stirlinga

Fig. 8. The effect of compression ratio on the efficiency and the theoretical work of Stirling cycle

Na podstawie obliczeń dla obiegu Stirlinga uzyskano wykres prezentujący wpływ stopnia sprężania na prace teoretyczną i sprawność jednostkową przy założonych różnych sprawnościach regeneratora (rys. 8).

Omawiając zasadę dziania silnika Stirlinga najlepiej przedstawić ją na przykładzie silnika typu alfa. Rysunek 9 przedstawia rysunki poszczególnych faz pracy silnika. Na rysunku a) cały czynnik roboczy znajduje się w cylindrze ciepłym H gdzie następuje jego podgrzanie. W wyniku podgrzewania czynnika dochodzi do wzrostu ciśnienia panującego w cylindrze. Powoduje to ruch tłoków, a tym samym zwiększenie przestrzeni roboczej. Rysunek b) prezentuje drugą fazę pracy silnika, w której większość czynnika roboczego znajdująca się w części gorącej silnika H przepływa do części zimnej K nagrzewając wkład regeneratora R. Koło zamachowe gwarantuje dalszy obrót wału korbowego i ruch tłoków w cylindrach. Rysunek c) przedstawia stan, w którym większość czynnika roboczego znajduje się w cylindrze zimnym K. Chłodzenie czynnika powoduje spadek ciśnienia i prowadzi do ruchu tłoka po stronie zimnej w górę. Rysunek d) przedstawia ostatnią fazę pracy silnika, w której w wyniku ruchu tłoka po stronie zimnej w górę, czynnik roboczy przepływa przez regenerator R do części gorącej silnika H. Ciepło zgromadzone we wkładzie regeneratora jest oddawane do czynnika. W chwili gdy większość czynnika znajdzie się po stronie gorącej H, cykl zaczyna się od początku.



Rys. 9. Fazy pracy silnika Stirlinga

Fig. 9. Phases of the Stirling engine

Silnik Stirlinga znajduje obecnie coraz szersze zastosowania jako agregat kogeneracyjny oraz jako agregat prądowłórczy zasilany odnawialnymi źródłami energii, takimi jak energia słoneczna czy biomasa. Zastosowanie Silnika

Stirlinga jako agregatu pozyskującego energię elektryczną z ciepła odpadowego znajduje się jak dotąd w fazie eksperymentalnej. Ze względu na zróżnicowany charakter źródeł nie można określić typowej sprawności takiego układu.

5. PORÓWNANIE

Porównując silnik Stirlinga i obieg ORC można odnieść wrażenie, że są to maszyny bardzo podobne co do zasady działania. Główne różnice wynikają z użytego medium, które w obiegu ORC ulega przemianie fazowej w przeciwieństwie do silnika Stirlinga. Wynikającą z tej własności zaletą silnika Stirlinga jest możliwość stosowania go w szerokim zakresie temperatur źródeł zarówno górnych jak i dolnych. Obieg ORC dzięki wysokiemu stopniowi podobieństwa do obiegu Rankine'a posiada większość jego zalet oraz wad dodatkowo uwzględniając specyfikę innego czynnika roboczego. Silnik Stirlinga ze względu na ograniczoną objętość czynnika roboczego oraz jego przepływ zwrotny charakteryzuje się skomplikowaną konstrukcją wymienników ciepła o stosunkowo dużej wadze. Podstawowe cechy prezentowanych rozwiązań zostały zestawione w Tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie cech silnika Stirlinga i obiegu ORC
Table 1. Comparison of features of the Stirling engine and Organic Rankine Cycle

| | Silnik Stirlinga | Obieg ORC |
|------------------------|---|---|
| Zalety | <ul style="list-style-type: none"> • Prosta konstrukcja • Niska emisja hałasu • Prosta obsługa • Nietoksyczny czynnik roboczy • Szerokie możliwości zastosowania • Kompaktowa budowa | <ul style="list-style-type: none"> • Znana, zoptymalizowana technologia z wieloma zastosowaniami komercyjnymi • Szerokie możliwości zastosowania • Szeroki wybór czynników roboczych • Bardzo elastyczny w stosunku do zmian obciążenia |
| Wady | <ul style="list-style-type: none"> • Stosunkowo duża masa na moc jednostkową • Wysoki koszt produkcji • Urządzenie wysokociśnieniowe (min. 40 bar) • Hel jako czynnik roboczy • Mało elastyczny w stosunku do zmian obciążenia | <ul style="list-style-type: none"> • Czynnik roboczy szkodliwy dla środowiska i układu • Skomplikowany układ (rurociągi, wymienniki ciepła) • Problem ze stabilnością chemiczną czynnika • Wymaga częstego i kosztownego serwisowania |
| Typowy zakres mocy [7] | 1-200 kW _{el} | 200-2000 kW _{el} |

6. WNIOSKI

Odzyskiwanie ciepła odpadowego i jego konwersja na energię elektryczną stanowi istotne wyzwanie dla współczesnej energetyki. Dwie technologie odzysku tego ciepła, które zostały wytypowane do porównania w tym artykule stwarzają możliwość efektywnego jego wykorzystania do produkcji energii elektrycznej. Najważniejszym wnioskiem płynącym z porównania jest fakt, że obieg ORC jest bardziej właściwy dla zastosowań większej skali, zaś silnik Stirlinga dla energetyki rozproszonej. Technologia ORC jest w chwili obecnej znacznie szerzej używana do odzysku ciepła odpadowego niż silnik Stirlinga. Dalsze udoskonalanie obu technologii i ich coraz szersze zastosowanie we współczesnej energetyce wydają się słusznym kierunkiem rozwoju.

LITERATURA

- [1] Quoilin S., *Sustainable Energy Conversion Through the Use of Organic Rankine Cycles for Waste Heat Recovery and Solar Applications*, Doctoral thesis, University of Liege, 2011.
- [2] Declaye S., *Design, optimization and modeling of an organic Rankine cycle for waste heat recovery*, University of Liege, 2009.
- [3] Wang H., *Optimization of Low-Temperature Exhaust Gas Waste Heat Fueled Organic Rankine Cycle*, Journal of iron and steel research, 2012.
- [4] Quoilin S., Van Den Broek M., Declaye S., Dewallef P., Lemort V., *Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013.
- [5] <http://www.stadtwerke-kempen.de/>, dostęp: 23.05.2013.
- [6] Żmudzki S., *Silniki Stirlinga*. Warszawa, WNT 1993.
- [7] Thomas B., *Stirling-BHKW's Einsatz von Biomasse*, Hochschule Reutlingen, Maschinenbau, 2005.
- [8] Kongtragool B., Wongwises S., *A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines*. Renewable and Sustainable Energy Reviews (7), 2003.
- [9] Luft S., *Podstawy budowy silników*. Warszawa, WKŁ 2006.