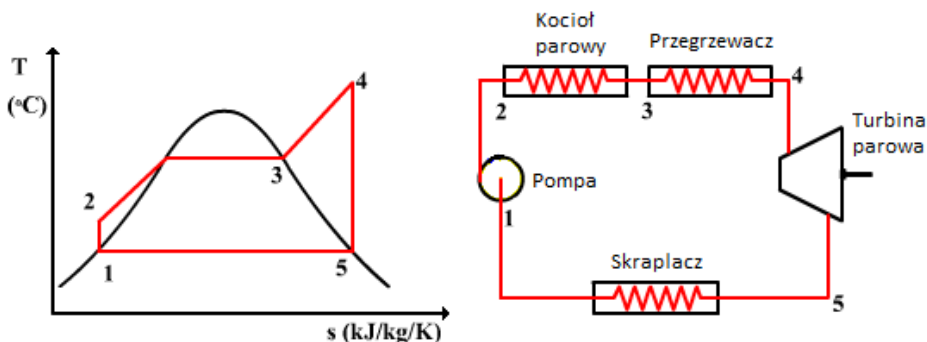


Artur Malecki<sup>1</sup>, Adrian Chmielewski<sup>2</sup>, Tomasz Mydlowski<sup>3</sup>, Robert Gumiński<sup>4</sup>, Jacek Dybała<sup>5</sup>

## SILNIKI SPALANIA ZEWNĘTRZNEGO W UKŁADACH MIKROKOGENERACJI

### 1. Kogeneracja.

Skojarzona gospodarka energetyczna, inaczej kogeneracja, a w literaturze anglojęzycznej CHP (Combined Heat and Power) jest to proces technologiczny jednoczesnego wytwarzania energii elektrycznej i użytkowej energii cieplnej w elektrociepłowni [1]. Zgodnie z unijną Dyrektywą 2004/8/EC literalnie "kogeneracja" oznacza równoczesne wytwarzanie energii cieplnej i energii elektrycznej i/lub mechanicznej w trakcie tego samego procesu [2]. Ze względu na mniejsze zużycie paliwa, zastosowanie kogeneracji daje duże oszczędności ekonomiczne i jest korzystne pod względem ekologicznym – w porównaniu z odrębnym wytwarzaniem ciepła w klasycznej ciepłowni i energii elektrycznej w elektrowni kondensacyjnej (elektrownia pracująca według obiegu Rankine'a, bez wykorzystania ciepła odpadowego). Szacuje się, że ok 90% elektrowni na świecie pracuje według obiegu Rankine'a [3], sprawność wytwarzania energii elektrycznej w taki sposób wynosi przeciętnie ok. 40% [4, 5].



Rys. 1. Obieg Rankine'a (bez regeneracji ciepła) [26].

Obieg Rankine'a pokazano na rysunku 1. Obieg ten składa się z następujących przemian: 1-2 – izentropowe pompowanie czynnika w stanie ciekłym, 2-3 – izobaryczne ogrzewanie czynnika roboczego aż do całkowitego odparowania (punkt 3), 3-4 – izobaryczne ogrzewanie pary w przegrzewaczu, 4-5 – izentropowe rozprężania pary w turbinie, 5-1 – izobaryczne skroplenie rozprężonej pary.

<sup>1</sup> Mgr inż. Artur Malecki, doktorant na wydziale SiMR,

<sup>2</sup> Mgr inż. Adrian Chmielewski, doktorant na wydziale SiMR

<sup>3</sup> Mgr inż. Tomasz Mydlowski, doktorant na wydziale SiMR,

<sup>4</sup> Dr inż. Robert Gumiński, adiunkt na wydziale SiMR

<sup>5</sup> Prof. nzw. dr hab. inż. Jacek Dybała, profesor na wydziale SiMR

Dzięki kogeneracji możliwe jest przetworzenie energii ze sprawnością przeciętnie ok. 80% [6]. W nowszych elektrociepłowniach możliwe jest wykorzystanie 85% dostarczonej energii – w takiej sytuacji jedynie 15% energii jest traconej, z czego ok. 13% to straty ciepła, natomiast 2% to straty przesyłowe). W pracy [7] zaprezentowano koncepcję elektrociepłowni, gdzie przy wykorzystaniu ogniw paliwowych możliwe jest przetworzenie energii ze sprawnością (zależną od trybu pracy) sięgającą nawet do 95,9%.

## **2. Mikrokogeneracja.**

Odmianą kogeneracji jest mikrokogeneracja. Mikrokogeneracja zgodnie z zapisami dyrektywy 2004/8/EC oznacza produkcję skojarzoną z maksymalną wydajnością poniżej 50 kW. Mikrokogeneracja jest zatem dedykowana do użycia w prywatnych przedsiębiorstwach, małych fabrykach i użytku domowego; czyli wszędzie tam gdzie występuje zapotrzebowanie na energię elektryczną oraz energię cieplną biorącą udział w procesach technologicznych lub wykorzystywaną do celów grzewczych (np. centralne ogrzewanie, ciepła woda itp.).

Układy mikrokogeneracyjne cieszą się coraz większą popularnością wśród nabywców, co związane jest przede wszystkim z niższymi kosztami pozyskania energii [8], a także z zapewnieniem niezależności energetycznej. Pomimo, że mikrokogeneracja charakteryzuje się mniejszą sprawnością niż jej odpowiednik w skali makro, to w związku ze zminimalizowaniem strat przesyłowych (zarówno energii cieplnej, jak i energii elektrycznej) może w znaczny sposób przyczynić się do zmniejszenia emisji CO<sub>2</sub> oraz substancji toksycznych do atmosfery [9, 10]. Mając na uwadze powyższe, widać jak ważny jest rozwój układów mikrokogeneracji związany ze zwiększeniem sprawności, zwiększaniem niezawodności oraz trwałości przy jednoczesnym ograniczeniu zagrożeń środowiskowych (wykorzystanie przyjaznych dla środowiska czynników roboczych, ograniczenie emisji substancji toksycznych przy spalaniu).

## **3. Silniki spalania zewnętrznego.**

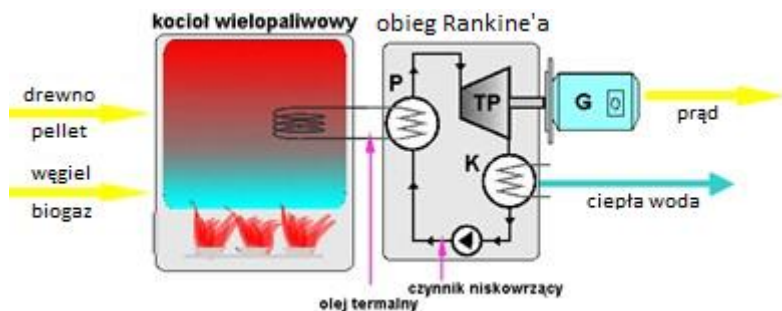
Pośród użytkowników układów mikrokogeneracyjnych często pojawia się chęć wykorzystania paliw stałych typu: węgiel, drewno, pellet, które nie nadają się do spalania w silnikach o spalaniu wewnętrznym. W takiej sytuacji konieczne okazuje się wykorzystanie silników o spalaniu zewnętrznym, spośród których istotną rolę odgrywają silniki Stirlinga i siłownie parowe pracujące wg. obiegu Rankine'a.

Silniki Stirlinga charakteryzują się małą mocą w odniesieniu do masy i gabarytów silnika, dlatego też w układach kogeneracyjnych są stosowane zdecydowanie rzadziej niż siłownie parowe (duże rozmiary silników Stirlinga generują odpowiednio duże koszty produkcji oraz większe koszty eksploatacji związane z bardziej rozbudowaną infrastrukturą). Problem ten występuje również w układach mikrokogeneracyjnych, w przypadku których oczekuje się kompaktowej konstrukcji oraz łatwości zabudowy.

Dlatego też wg. autorów tej publikacji najlepszym rozwiązaniem dla układów mikrokogeneracyjnych zasilanych paliwami nie nadającymi się do spalania w silnikach o spalaniu wewnętrznym jest siłownia parowa, czyli realizacja obiegu Rankine'a. Schemat takiego układu pokazano na rysunku 2.

Należy zwrócić uwagę, na odpowiedni dobór rozprężarki w przedstawionym układzie. Urządzenie to warunkuje sprawność, niezawodność oraz cichobieżność układu. Trudno wskazać najlepszy rodzaj rozprężarki dla układów mikrokogeneracyjnych, a jej

dobór zależy m.in. od mocy układu, czynnika roboczego, zakładanej trwałości i wymagań dotyczących poziomu hałasu. Kolejne rozdziały niniejszej publikacji przedstawiają przegląd wiodących rozprężarek, które mogłyby być użyte w nowoczesnym układzie mikrogeneracyjnym.



Rys. 2. Układ mikrogeneracyjny [22].

### 3. Wymagania stawiane rozprężarkom pary.

W pracy [11] przedstawiono porównanie silników ekspansyjnych, które mogą być użyte do realizacji obiegu Rankine'a na potrzeby mikrogeneracji, przy produkcji mocy elektrycznej w zakresie 5-20kW. Do tych potrzeb autorzy założyli realizację niskotemperaturowego obiegu (przegrzanie do 10°C) przy użyciu pary wodnej i postawili następujące wymagania dla rozprężarki:

- sprawność powyżej 65%,
- prędkość obrotowa 3000-5000obr/min (typowa prędkość obrotowa generatorów prądu, pomp, wentylatorów i innych urządzeń przemysłowych),
- duża niezawodność,
- możliwie mała ilość ruchomych części
- cicha praca,
- możliwość pracy w obszarze pary wilgotnej, bez znacznego spadku osiągnięć, a także bez przyspieszenia zużycia maszyny
- możliwie płaskie charakterystyki sprawności, szeroki zakres warunków pracy.

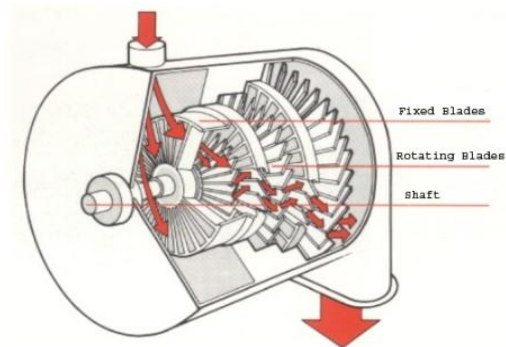
Rozprężarki można podzielić na dwie grupy: turbiny oraz maszyny wyporowe. Maszyny wyporowe charakteryzują się na ogół prędkością obrotową poniżej 5000 obr/min, natomiast turbiny powyżej 5000 obr/min [12], dlatego w ich przypadku często stosuje się przekładnię pomiędzy wałem turbiny a generatorem (lub innej maszyny). Moc maszyn wyporowych rośnie wraz z prędkością obrotową, natomiast turbiny zachowują się odwrotnie.

### 4. Turbiny.

Jak wykazano w pracy [13] turbiny nie sprawdzają się w aplikacjach poniżej 50kW, czyli w zakresie mocy typowych dla mikrogeneracji. Wady małych turbin to:

- niska sprawność,
- duże koszty wyprodukowania, w szczególności że takie aplikacje wymagają wielostopniowego rozprężania (rysunek 3),

- bardzo wysoka prędkość obrotowa – często występuje konieczność stosowania przekładni, co generuje kolejne koszty, a także przyczynia się do powstawania strat mocy mechanicznej, czego efektem jest spadek sprawności ogólnej układu,
- duża wilgotność może przyczynić się do szybkiej erozji łopatek turbiny



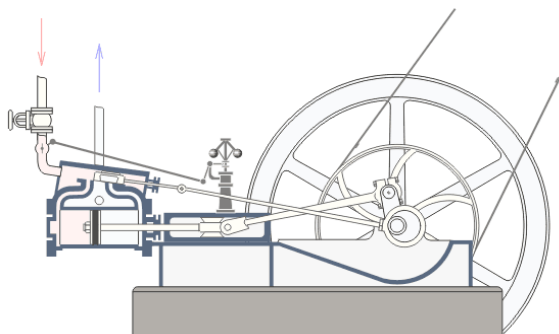
Rys. 3. Turbina wielostopniowa [25].

### 5. Silnik tłokowy – klasyczna maszyna parowa.

W wielu badaniach i publikacjach naukowych wykazano, że maszyna parowa, której schemat przedstawiono na rysunku 4 nie jest dobrym silnikiem do zastosowania w układach mikrokogeneracji. Największe jej wady to:

- mała sprawność,
- zbyt duże gabaryty w przypadku zwiększania sprawności przez wielostopniowe rozprężanie,
- nierównomierna praca,
- nierównomierna prędkość obrotowa,
- nierównomierność dostarczania momentu obrotowego,
- drgania korpusu silnika.

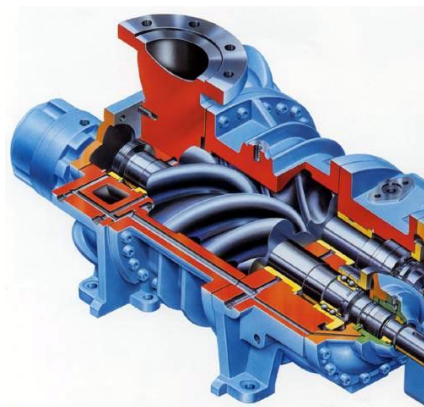
Nierównomierność biegu maszyny parowej można zminimalizować poprzez zastosowanie odpowiednio dużego koła zamachowego. Trzeba jednak, wziąć pod uwagę że przyczynia się to do zwiększenia masy i gabarytów silnika – co w przypadku układów mikrokogeneracyjnych często jest istotną wadą.



Rys. 4. Maszyna parowa [23].

## 6. Rozprężarki śrubowe.

W pracy [14] dla maszyn o mocy na wale wyjściowym w zakresie 10-100kW wykazano znaczącą przewagę rozprężarki śrubowej (rysunek 5) nad silnikami tłokowymi i turbinami w realizacji obiegu Rankine'a wykorzystującym czynnik roboczy R-114 do napędu generatora prądu. Uzyskano wysoką sprawność rozprężarki w szerokim zakresie prędkości obrotowych, zarówno przy pełnym, jak i częściowym obciążeniu. Natomiast w pracy [15] rozważono możliwość zastosowania wielostopniowych turbin, rozprężarek śrubowych i tłokowych do generowania mocy elektrycznej i mechanicznej w zakresie 15-500kW. Okazało się, że pomimo wysokiej sprawności turbin przekraczającej 60%, w zakresie mocy 15-200kW rozprężarki śrubowe uzyskują jeszcze wyższą sprawność, przy czym maszyna śrubowa uzyskuje tę samą moc co turbina przy około cztero-krotnie niższej prędkości obrotowej – co jest kolejną zaletą. Dodatkowo konstrukcja rozprężarki śrubowej jest prostsza od turbiny, dzięki czemu koszty produkcji są niższe.



Rys. 5. Budowa rozprężarki śrubowej [24].

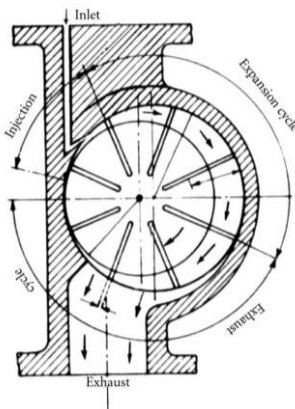
## 7. Rozprężarka łopatkowa

Rozprężarka łopatkowa jest to wolnoobrotowa maszyna wyporowa. Rozprężarki łopatkowe (rysunek 6) charakteryzują się niską sprawnością ok 25-35%, związaną z małym stopniem rozprężania. Odgrywają one jednak istotną rolę w realizacjach obiegu Rankine'a szczególnie w przypadkach gdy istnieje duże zapotrzebowanie na ciepło. Możliwe jest także zwiększenie sprawności przez wielostopniowe rozprężanie pary. Do największych zalet rozprężarek łopatkowych zaliczamy:

- prostą konstrukcję,
- niską cenę,
- samoczynny rozruch, również pod obciążeniem,
- niską prędkość obrotową,
- łatwo wyważyć część wirującą,
- cicha praca, niski poziom wibracji,
- prawie jednakowa sprawność w całym zakresie warunków pracy.

Niestety jak zaobserwowano w pracach [16] i [17] problemem jest smarowanie tych urządzeń. Dotrysk oleju do pary powoduje powstanie trudnej do rozdzielenia emulsji na wylocie z maszyny, natomiast brak smarowania przyczynia się do przyspieszonego

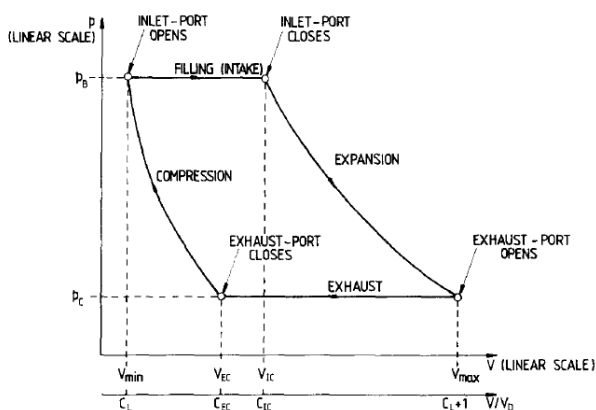
zużycia i pojawiania się nieszczelności, a także wzrostu tarcia, co z kolei obniża moc na wale wyjściowym i sprawność rozprężarki. Pojawia się jednak szansa na rozwiązanie tego problemu, w pracy [18] przedstawiono możliwość odzysku 99,7% oleju stosując jedynie separator grawitacyjny. Możliwe jest dalsze oczyszczenie wody do zawartości 5 ppm oleju stosując filtry o odpowiedniej wielkości porów [19].



Rys. 6. Rozprężarka łopatkowa [27].

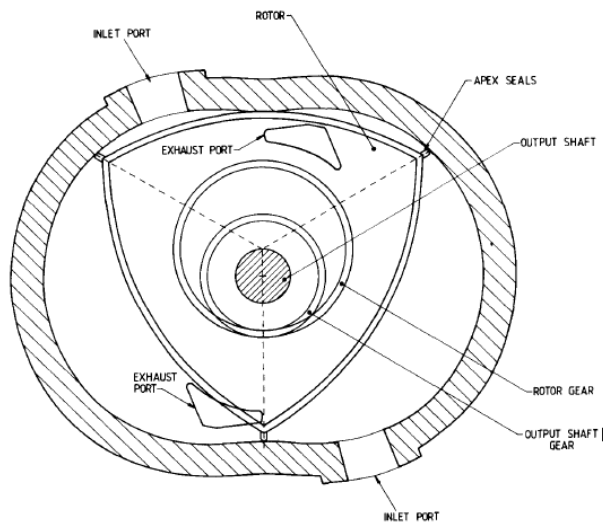
## 8. Silnik Wankla

Silnik Wankla charakteryzuje się najlepszymi parametrami spośród maszyn z tłokiem obrotowym. Jak wykazano w pracach [11, 19 i 20] świetnie nadaje się do wykorzystania jako rozprężarka pary. Silnik ten w stosunku do oryginalnej postaci (silnik spalania wewnętrznego) wymaga niewielkich modyfikacji, aby mógł pracować jako rozprężarka. Przykład przerobionego silnika można znaleźć w pracy [11], co pokazano na rysunku 6. Teoretyczny obieg takiego silnika [20] pokazany na rysunku 7 jest tożsamy z obiegiem maszyny parowej (silnik tłokowy).



Rys. 7. Obieg teoretyczny silnika Wankla zasilanego parą [11].

Dużą zaletą silnika Wankla (jego schemat przedstawiono na rysunku 8) w porównaniu z silnikiem tłokowym jest cichsza praca i niższy poziom wibracji [21]. W pracy [21] można znaleźć przykład wyników symulacji komputerowych i badań rzeczywistego układu mikrokogeneracji opartego o silnik Wankla. W konkluzji autorzy stwierdzili, że w aplikacjach mikrokogeneracji o mocach od 5kW do 50kW stosując silnik Wankla można uzyskać sprawność całego obiegu Rankine'a na poziomie ok. 25% co jest wynikiem na wysokim poziomie przy tak małych aplikacjach.



Rys. 8. Zmodyfikowany silnik Wankla [11].

## 8. Podsumowanie

Przytoczone w niniejszym artykule fakty dotyczące mikrokogeneracji świadczą o istotnej roli siłowni parowych we współczesnej technice. Siłownie te odgrywają szczególną rolę w układach mikrokogeneracyjnych zasilanych paliwami nie nadającymi się użycia w silnikach spalania wewnętrznego (paliwa stałe - np. węgiel, drewno). Jak wykazano – w mikrokogeneracji najlepszymi parametrami charakteryzują się rozprężarki wyporowe, przy czym tłokowa maszyna parowa jest najgorsza z tej grupy maszyn. Widać, więc że potrzebny jest dalszy rozwój siłowni parowych, a w szczególności rozprężarek warunkujących podstawowe parametry całego układu. Wzrost sprawności tych urządzeń może przyczynić się do rozwoju mikrokogeneracji. To z kolei (poza interesem ekonomicznym) przyniesie wymierne korzyści dla środowiska (ograniczenie emisji CO<sub>2</sub> i substancji toksycznych).

Nie mniej istotne jest zwiększanie niezawodności i trwałości omawianych rozprężarek. W tym zagadnieniu duży potencjał ma zastosowanie organicznych czynników roboczych zamiast pary wodnej. Zgodnie z założeniami, w mikrokogeneracji realizowany jest na ogół niskotemperaturowy obieg Rankine'a, w którym doskonale sprawdzają się organiczne czynniki robocze (ze względu na niższą temperaturę wrzenia). Ze wspomnianymi organicznymi czynnikami roboczymi można mieszać substancje smarne, dzięki którym można znacząco podnieść trwałość i niezawodność rozprężarek wyporowych.

## Literatura:

- [1] Chochowski A., „Energia" wyd. Difin; s. 86-87, Warszawa, 2012.
- [2] Bańkowski T., Żmijewski K.; Analiza możliwości i zasadności wprowadzenia mechanizmów wsparcia gazowych mikroinstalacji kogeneracyjnych – WSPARCIE ENERGETYKI ROZPROSZONEJ – ENERGETYKA SPOŁECZNA; Warszawa 2012.
- [3] Wisser, Wendell H. (2000). Energy resources: occurrence, production, conversion, use.. pp. 190, Birkhäuser 2000.
- [4] Paska J. Wytwarzanie energii elektrycznej. Oficyna Wydawnicza PW. Warszawa 2005.
- [5] Zandian A., Ashjaee M. „The thermal efficiency improvement of a steam Rankine cycle by innovative design of a hybrid cooling tower and a solar chimney concept" Renewable Energy No.51 pp. 465-473, 2013.
- [6] Shipley A., Hampson A., Hedman B., Garland P., Bautista P.; COMBINED HEAT AND POWER Effective Energy Solutions for a Sustainable Future; Energy Efficiency and Renewable Energy 2008.
- [7] Martín S., Zamora I., San Martín J., J., Aperribay, V., & Eguía, P. Trigeneration Systems with Fuel Cells. POWER, No. 40, pp. 65-85, 2008.
- [8] Babus'Haq, R. F., Pearson, J. P., Probert, S. D. & O'Callaghan, P. W., Economics of mini-combined heat-and-power packages for use in hotels. Heat Recovery System & CHP, 10(3) (1990) 269-275.
- [9] Evans, R. D., Environmental and economic implications of small-scale CHP. Energy and Environment Paper No. 3, Energy Technology Support Unit for the UK Department of Energy, March 1990.
- [10] Orchard W., CHP demonstration scheme reduces CO<sub>2</sub> emissions by 73 percent. Energy Management (Feb./March 1990) pp. 1- 20, 1990.
- [11] O. Badr, S. Naik, P. W. O'Callaghan, S. D. Probert; Expansion Machine for a Low Power-Output Steam Rankine-Cycle Engine; Applied Energy 39 (1991) 93 116
- [12] Badr O., O'Callaghan, Hussein P. W., M. & Probert, S. D., Multi-vane expanders as prime movers for low-grade energy organic Rankine-cycle engines. Applied Energy., 16(2) pp. 129-146, 1984.
- [13] Bahadori, M. N., Solar water-pumping. Solar En., 21(4) 307-16, 1978.
- [14] Suri, R., Chandra, S., Kreshnamorthy, M. V., Srinivasamurthy, S., Berndorfer, K., Hopmann, H. & Wolf, D., Development of small power-plants in rural areas in India. Proc. ISES Congress, New Delhi, India, , pp. 1722-1727, 1978.
- [15] Lorenz, J., Fuestel, J. & Kraft, M., New developments for future solar-power plants. Proc. Int. Syrup.: Workshop on Solar Energy, Cairo, Egypt, 16-22 June, Vol. 3, pp. 1318-28, 1978.
- [16] O'Callaghan, P. W., Wood, R. J., Bell, M. A., Hussein, M., Patel, R. M., Buick, T.R. & Probert, S. D., Optimisation of a multi-vane expander as the prime mover in an organic Rankine cycle. Final report of Contract No. EEB/1/121/80/UK/H, Commission of European Communities, 1983.
- [17] O'Callaghan, P. W., Bell, M. A. & Wood, R. J., The development of heat-engine driven heat-pumps. Final Report of Contract No. GR/B/75334, SERC, UK, 1984.
- [18] O'Neill, P., Development of the screw compressor and its application in the petrochemical and related industries. Paper no. C48/81, Proceedings of the Fluid Machinery for the Oil, Petrochemical and Related Industries Conference, 24-26



March 1981, The Hague, Netherlands. Mechanical Engineering Publications, London, , pp. 1 - 13, 1981.

- [19] Badr O., Naik S., O'Callaghan P. W. & Probert S. D., Wankel Engines as Steam Expanders: Design Considerations; Applied Energy 40 pp. 157-170, 1991.
- [20] Badr O, Naik S, O'Callaghan PW, Probert SD. Rotary Wankel engines as expansion devices in steam Rankine-cycle engines. Applied Energy; 39(1): pp. 59–76, 1991.
- [21] Antonelli M., Martorano L., A study on the rotary steam engine for distributed generation in small size power plants; Applied Energy 97 pp. 642–647, 2012.
- [22] Instytut Maszyn Przepływowych PAN, <http://imp.gda.pl/> (marzec 2014)
- [23] Wikipedia, the free encyclopedia <http://www.wikipedia.org/> (marzec 2014)
- [24] Hydrocarbons Technology <http://www.hydrocarbons-technology.com/> (marzec 2014)
- [25] Power Engineering <http://www.power-eng.com/> (marzec 2014)
- [26] Thermodynamics Micro Module <http://www.engr.usask.ca/> (marzec 2014)
- [27] Bharat Raj Singh, Onkar Singh, A Study of Performance Output of a Multivane Air Engine Applying Optimal Injection and Vane Angles, International Journal of Rotating Machinery, Volume 2012, 2012

### **Streszczenie**

W pracy przedstawiono możliwości wykorzystania silników spalania zewnętrznego, a w szczególności siłowni parowych we współczesnych układach mikrokogeneracyjnych. Zwrócono uwagę na zalety maszyn waporowych w układach mikrokogeneracyjnych, gdzie w przeciwieństwie do układów w skali makro parametry turbin są bardzo niekorzystne. Opisane zostały alternatywne dla maszyny parowej silniki ekspansyjne takie jak rozprężarka śrubowa, łopatkowa i silnik Wankla. Urządzenia te charakteryzują się bardzo dobrymi parametrami pod kątem wykorzystania ich w układach mikrokogeneracyjnych. Szczególnie dobrze sprawdzają się one w układach mikrokogeneracji realizujących niskotemperaturowy obieg Rankine'a. Podkreślono również fakt, że w przypadku zastąpienia pary wodnej czynnikiem organicznym trwałość i niezawodność opisanych maszyn znacznie wzrasta, dzięki możliwości dostarczania środków smarnych wraz z czynnikiem roboczym.

**Słowa kluczowe:** Mikrokogeneracja, kogeneracja, energetyka rozproszona, siłownia parowa, obieg Rankine'a.

## **EXTERNAL COMBUSTION ENGINES IN MICRO- COGENERATION SYSTEMS**

### **Abstract.**

This paper presents the possibilities of using external combustion engines, especially Rankine cycle engines in modern micro-cogeneration systems. Special attention is paid to the advantages of positive displacement machines in micro-cogeneration systems, in which in contrast to systems at the macro level, parameters of turbines are very disadvantageous. There are described expansion machines, such as screw expander, vane expander and Wankel engine, which are an alternative to the reciprocating engine. These devices have very good parameters for use in micro-cogeneration systems. They are well suited for micro-cogeneration systems serving low-temperature Rankine cycle. It is also

highlighted that in the case of replacing steam with organic working fluid in above-described machines reliability and durability increases significantly due to the ability to deliver lubricants with the working fluid.

**Keywords:** Micro-cogeneration, cogeneration, distributed generation, steam engine, Rankine cycle.