

## Energy recuperation with use of the thermodynamic cycles

*Abstract: One of the most important priorities placed before the thermal machine builders is increase in their efficiency and limitation of their influence on the environment by reduction of harmful components and waste heat emission to the atmosphere. These restrictions are enforced by rising fuel prices and increasingly stringent environmental standards. One of the ways of achieving this goal is the use of energy recovery systems. These systems are used in both industrial applications as well as in motor vehicles and working machines. In industrial generator sets are commonly used cogeneration systems that utilize waste heat from the combustion engine for heating purposes or waste heat from the production process directly as the aid to electric current generation. They are currently being developed and partially implemented systems using theoretical Rankine cycles, Ericsson, and Stirling to ensure high efficiency conversion of heat.*

Keywords: energy recovery, Rankine cycle, Ericsson cycle, Stirling cycle

### Rekuperacja energii z wykorzystaniem obiegów termodynamicznych

*Streszczenie: Jednym z najważniejszych priorytetów stawianych przed konstruktorami maszyn cieplnych jest zwiększenie ich sprawności oraz ograniczenie ich wpływu na środowisko przez zmniejszenie emisji szkodliwych związków do atmosfery i odpadowego ciepła. Ograniczenia te są wymuszone wzrostem cen paliw, jak i coraz bardziej rygorystycznym normom ekologicznym. Jednym ze sposobów realizacji tego celu jest stosowanie układów rekuperacji energii. Układy te stosowane są zarówno w instalacjach przemysłowych jak i w pojazdach samochodowych i maszynach roboczych. W przemysłowych agregatach prądotwórczych najczęściej stosuje się układy kogeneracyjne wykorzystujące ciepło odpadowe z silnika spalinowego w celach grzewczych lub ciepło odpadowe z procesów produkcyjnych bezpośrednio do wspomagania generowania prądu elektrycznego. Obecnie są opracowywane i częściowo wdrażane układy wykorzystujące obiegi teoretyczne Rankine'a, Ericssona i Stirlinga mające zapewnić dużą sprawność konwersji ciepła.*

Słowa kluczowe: rekuperacja energii, obieg Rankine'a, obieg Ericssona, obieg Stirlinga

#### 1. Wstęp

Rozwiązania mające na celu wykorzystanie energii odpadowej pochodzącej z maszyn cieplnych i procesów przemysłowych od dawna były stosowane w celu zwiększenia sprawności maszyn cieplnych i procesów technologicznych. Wpływa to na zmniejszenie zużycia paliwa, emisji spalin i ciepła do atmosfery, co ma szczególne znaczenie w związku z rosnącymi wymaganiami dotyczącymi ekologii.

Układy rekuperacyjne odzyskujące ciepło z procesów technologicznych lub obiektów przemysłowych czy mieszkalnych nie mają zwykle ograniczeń gabarytowych. Elementami, w których następuje rekuperacja są różnego typu wymienniki ciepła: krzyżowe, obrotowe czy przeciuprądowe. Wymienniki w zależności od konstrukcji cechuje różna sprawność. Wymienniki krzyżowe mają sprawność ok. 60%, obrotowe do 75%. Największą sprawność, do 90%, mają wymienniki przeciuprądowe. Wysoka sprawność tych urządzeń wynika z faktu, że nie dokonują one zamiany rodzaju energii, a jedynie powodują jej odzysk.

W związku ze wzrostem cen paliw, jak i coraz bardziej rygorystycznymi normami emisji toksycznych składników spalin, coraz więcej uwagi

poświęca się układom odzyskiwania energii w pojazdach.

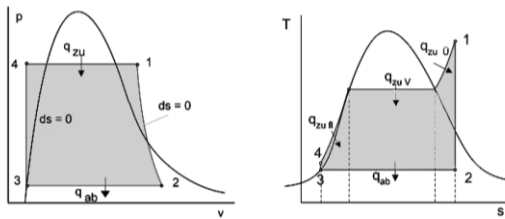
Za pierwsze układy tego typu można uznać systemy odzyskujące tracone ciepło do celu ogrzewania wnętrza pojazdu lub podgrzewania określonych elementów układu zasilania paliwem czy powietrza doprowadzanego do silnika. Są to np. kolektory dolotowe, które w niskiej temperaturze zewnętrznej są podgrzewane odpadową energią. Tego typu systemy są stosowane od wielu lat praktycznie w każdym pojeździe.

Oprócz, tych stosowanych powszechnie rozwiązań, prowadzi się obecnie badania nad innymi metodami odzysku odpadowej energii cieplnej. Są to systemy odzysku ciepła z układów wylotowych silników spalinowych, przetwarzające energię w obiegach termodynamicznych takich jak: obieg Rankine'a, obieg Ericssona lub Stirlinga.

#### 2. Organiczny Obieg Rankine'a (Organic Rankin Cycle) ORC

Od dawna wykorzystuje się na skalę przemysłową do produkcji energii elektrycznej turbiny pracujące według obiegu Clausiusa-Rankine'a. Obieg ten przedstawiony na rys.9. składa się z:

- 1 - 2 - izentropowego (adiabaticznego) rozprężania pary w turbinie parowej,
- 2 - 3 - izobarycznego skroplenia rozprężonej pary (odprowadzenia ciepła w skraplaczu),



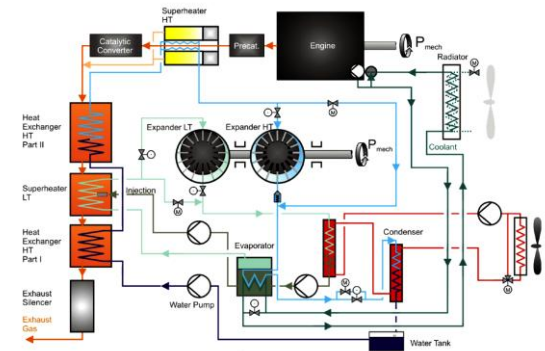
Rys.9. Obieg Clausiusa-Rankine'a

- 3 - 4 - izochorycznego, pompowania kondensatu w pompie,
- 4 - 1 - izobarycznego podgrzewania cieczy, jej odparowania oraz przegrzewania powstałej pary w kotle parowym lub wytownicy pary.

W zastosowaniach technicznych cyklu Rankine'a najczęściej stosowanym czynnikiem roboczym jest woda. W przypadku małej temperatury górnego źródła ciepła obiegu jako czynnika roboczego wykorzystuje się węglowodory. Obieg z takim czynnikiem nosi nazwę organiczny obieg Rankine'a ORC (ang. Organic Rankine Cycle). W układach rekuperacji w pojazdach stosowane są różne związki węglowodorowe, ze względu na ich właściwości termodynamiczne. Dla przykładu firma BMW stosuje R245fa albo mieszanekę R134a i R245fa[10], „Cummins” R245fa[7], natomiast „Mack Trucks” mieszanekę Fluorinol-50 (fluowodorek nikometanolu)[4]. Obecnie kilka firm zajmuje się pracami nad zastosowaniem tej technologii do odzysku energii w pojazdach, ale jako pierwsza zaczęła prowadzić prace od 2000 r. firma BMW.

W układach opartych o zastosowanie tej metody, wykorzystującej energię termiczną pochodzącą ze spalin, stosowana jest odrębna maszyna cieplna, którą jest zwykle silnik tłokowy lub turbina parowa. Na rys.10. jest przedstawione schematycznie urządzenie zwane „Turbosteamer” firmy BMW, w którym zastosowano turbinę parową.

Przedstawiona wersja układu jest systemem z podwójnym obiegiem. W pierwszym z obiegów, w którym znajduje się woda, energia cieplna jest odbierana z układu wylotowego przez przeciwprądowe wymienniki ciepła. Znajdujące się bliżej silnika, dzięki temu woda w obiegu odbiera większą ilość energii zamieniając się w parę. W postaci pary przechodzi przez wymiennik znajdujący się pomiędzy silnikiem i reaktorem katalitycznym, gdzie ulega przegrzaniu. Organiczny czynnik roboczy (np. R245fa), znajdujący się w równoległym układzie, przejmując energię z



Rys.10. Schemat układu „Turbosteamer”. [8]

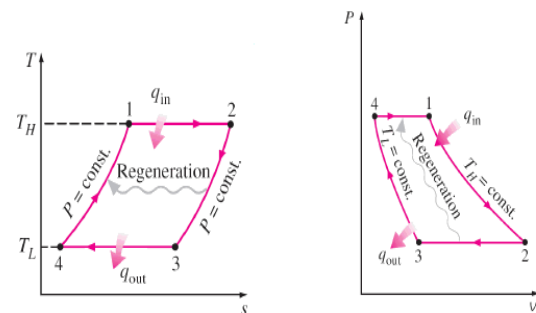
wymiennika ciepła znajdującego się w końcowej strefie układu wylotowego spalin, przed końcowym tłumikiem wydechu. W związku z tym, że ilość odbieranej przez niego energii jest znacznie mniejsza, czynnik ten musi mieć niższą temperaturę parowania. Po ogrzaniu obydwa czynniki trafiają na odrębne maszyny ekspansyjne, gdzie czynniki robocze ulegają rozprężeniu, zamieniając energię na mechaniczną i przekazując ją na wał silnika. Wykorzystany w ten sposób czynnik roboczy jest następnie skraplany w skraplaczu i kierowany do pompy tłoczącej, gdzie cykl rozpoczyna się od nowa.

Firma „Scania” prowadzi również prace polegające na wykorzystaniu pary, powstałej w wyniku chłodzenia silnika, przez bezpośredni wtłok wody na gorący cylinder. Para ta jest doprowadzana do turbiny, gdzie jej energia jest zamieniana na pracę mechaniczną.

W wyniku zastosowania pojedynczego organicznego obiegu Rankina, w celu rekuperacji energii uzyskano 10% zwiększenie sprawności silnika, a przy zastosowaniu podwójnego obiegu 15%. [8]

### 3. Układ z wykorzystaniem obiegu Ericssona

Jedną z odmian rekuperatorów odzyskują



Rys.13. Teoretyczny obieg Ericssona

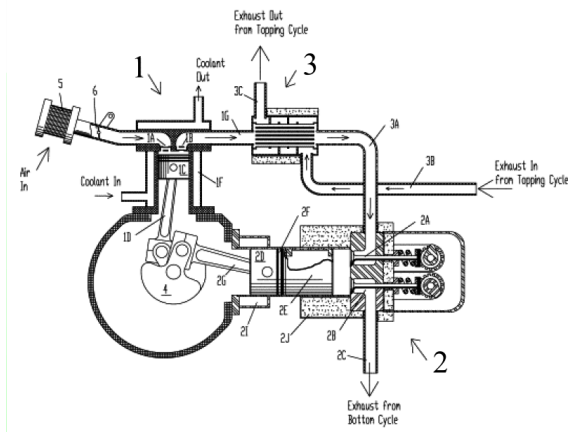
cych energię cieplną z układu wydechowego pojazdów oparta jest o obieg i zasadę pracy silnika Ericssona.

Silnik Ericssona należy do silników zewnętrznego spalania. Jego obieg teoretyczny został przedstawiony na rys.13. Składa się on z:

- 1-2 rozprężania izotermicznego z doprowadzeniem temperatury zewnętrznej,
- 2-3 regeneracji izobarycznej z przepływem ciepła od czynnika do regeneratora,
- 3-4 sprężania izotermicznego z odprowadzeniem ciepła,
- 4-1 regeneracji izobarycznej z przepływem ciepła do czynnika roboczego.

Na tych teoretycznych podstawach został skonstruowany i opatentowany przez firmę Proe Power Systems w USA, regenerator o nazwie Proe HRPG (ang. Heat Recovery Power Generator) przedstawiony schematycznie na rys.14.[9]

Pierwszym z elementów regeneratora jest sprężarka (1). Tłok sprężarki jest połączony korbowodem z wałem korbowym, który jest elementem wspólnym dla sprężarki i maszyny ekspansyjnej (2), w której znajduje się tłok roboczy. Kolejny element układu stanowi wymiennik ciepła (3), w którym następuje przejmowanie energii cieplnej od gazów spalinowych z silnika pojazdu.



Rys.14. Schemat układu regeneratora Proe HRPG [9]

Zgodnie z zasadą pracy silnika Ericssona, zasysanie powietrza następuje z otoczenia przez filtr (5). Ilość zasysanego powietrza jest regulowana przepustnicą (6). Powietrze jest kierowane kanałem dolotowym do cylindra sprężarki, gdzie podlega sprężeniu. W czasie przepływu ze sprężarki do części roboczej, powietrze przepływa przez regenerator (3), w którym następuje zwiększenie jego temperatury. Ten wzrost temperatury powoduje zwiększenie ciśnienia w cylindrze roboczym, w którym w tym czasie tłok wykonuje suw pracy. Po zakończeniu suwu pracy następuje otwarcie zaworu wylotowego i usunięcie ładunku z cylindra roboczego. Przesunięcie fazowe pomiędzy wykorbieniem tłoków wynosi ok. 90°. Wielkość wykonanej pracy jest różnicą pomiędzy pracą wykonywaną przez tłok sprężający, a pracą wykonaną przez tłok maszyny ekspansyjnej.

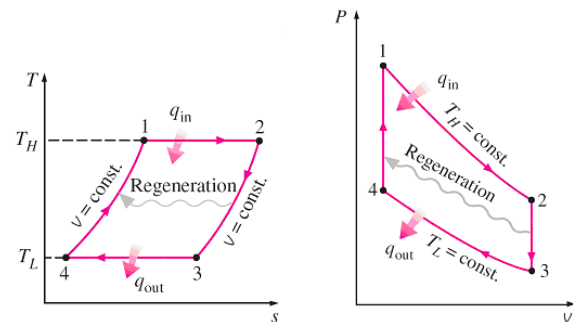
Odzyskana energia cieplna zamieniona w układzie HRPG na pracę mechaniczną jest przekazywana na wał silnika spalinowego. Układ ten zapewnia wykorzystanie 15-20% energii cieplnej spalin i zamianę jej na energię mechaniczną, natomiast ponad 50% energii zostaje wykorzystane do zwiększenia temperatury powietrza (do wartości ok. 150-200°C), które może zostać wykorzystane do innych celów.

#### 4. Układ z wykorzystaniem obiegu Stirlinga-Philipsa

W ostatnich latach przedmiotem badań i opracowań patentowych są rekuperatory oparte na zasadzie działania silnika Stirlinga. Na rys.15 przedstawiono teoretyczny obieg Stirlinga-Philipsa.

Ten obieg składa się z czterech przemian:

- 1-2 Rozprężanie izotermiczne z doprowadzeniem ciepła z zewnętrznego źródła,
- 2-3 Regeneracja izochoryczna z przepływem ciepła wewnątrz układu od czynnika do regeneratora,
- 3-4 Sprężanie izotermiczne z odprowadzeniem ciepła do otoczenia,
- 4-1 Regeneracja izochoryczna z przepływem ciepła wewnątrz układu z regeneratora do czynnika roboczego.



Rys.15. Teoretyczny obieg Stirlinga-Philipsa

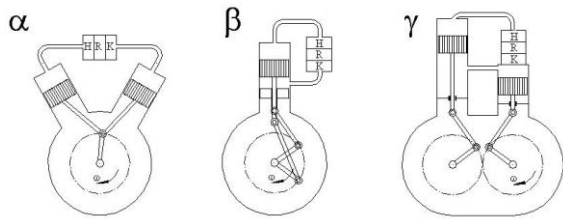
Teoretyczna sprawność obiegu Stirlinga jest równa sprawności obiegu Carnota.

$$\eta_{Stirling} = \eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}$$

Ze względu na swoją sprawność obieg Stirlinga jest w ostatnich latach przedmiotem coraz większego zainteresowania.

Istnieją trzy podstawowe rodzaje silnika Stirlinga pojedynczego działania, klasyfikowane w zależności od liczby i układu cylindrów:  $\alpha, \beta, \gamma$  (rys.16).

Poza klasycznymi rozwiązaniami wśród silników Stirlinga można wyróżnić układy dwustronnego działania oraz inne rozwiązania, do których należą układy z obrotowymi tłokami lub silniki termoakustyczne.

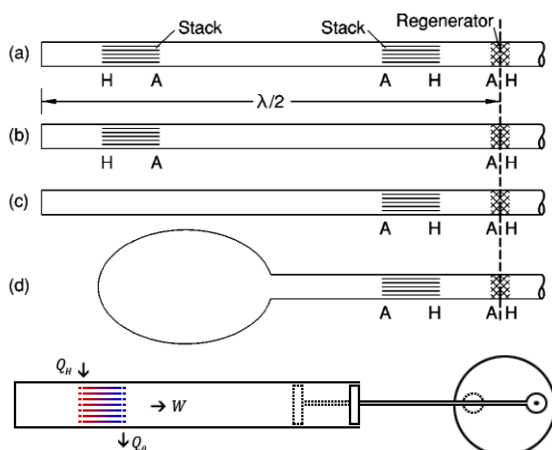


Rys.16. rodzaje konstrukcji silnika Stirlinga-Philipsa.

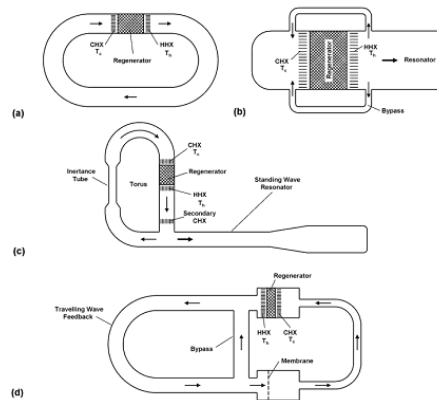
Od klasycznych konstrukcji silnika Stirlinga odbiega natomiast konstrukcja silnika termoakustycznego.

W klasycznym silniku Stirlinga, podobnie jak w silnikach tłokowych spalania wewnętrznego, w wykonywaniu pracy uczestniczą ruchome elementy, takie jak tłok, wypornik oraz związane z nimi układy korbowe. Silnik termoakustyczny, jest w stanie wykonać zamianę energii cieplnej na elektryczną, praktycznie bez żadnych ruchomych elementów i przy wysokiej częstotliwości pracy, co pozwala na uzyskanie większej mocy jednostkowej. Koncepcję silnika termoakustycznego opracował w 1887r. Lord Rayleigh rozważając możliwość wykorzystania fali akustycznej do transferu ciepła. Dalsze prace na ten temat prowadził Rott's w 1969r., a Peter Rijke opracował tzw. „Rijke tube” (rurę Rijkego), która była prostą konstrukcją silnika termoakustycznego, zamieniającego energię cieplną na energię akustyczną. W 1980r. zespół National Laboratories z Los Alamos, prowadzony przez Johna Wheatleya, zaczął rozważać możliwość praktycznego wykorzystania silnika termoakustycznego.

Silniki termoakustyczny można podzielić na silniki z akustyczną falą stojącą rys.17 oraz z falą biegnącą przedstawiony schematycznie na rys.18.

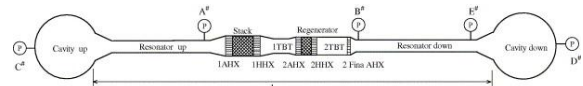


Rys.17. Schemat silnika termoakustycznego z falą stojącą [6].



Rys.18. Przykłady konstrukcji silnika termoakustycznego z falą biegnącą [5]

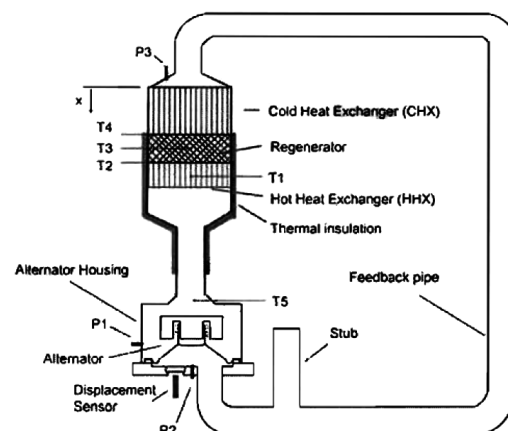
Złożenie obydwu tych konstrukcji tworzy układy nazywane kaskadowymi rys.19.



Rys.19. Silnik termoakustyczny w układzie kaskadowym. [6]

Zasada działania termoakustycznego silnika Stirlinga polega na tym, że kiedy fala akustyczna przechodzi przez silnik, ruch i oscylacje ciśnienia gazu powodują transportowanie ciepła od gorącego źródła do wymiennika ciepła wzmacniając amplitudę fali. Przy istniejącej różnicy temperatury każda porcja gazu ulega termodynamicznym przemianom wg. obiegu Stirlinga.

W oparciu o konstrukcję silnika termoakustycznego są budowane generatory prądu elektrycznego. Jedne z nich, generatory elektromechaniczne, dokonują zamiany fali akustycznej na prąd elektryczny przez oddziaływanie ciśnienia akustycznego na membranę połączoną z ruchomą cewką, która przemieszcza się wewnątrz magnesu rys.20.



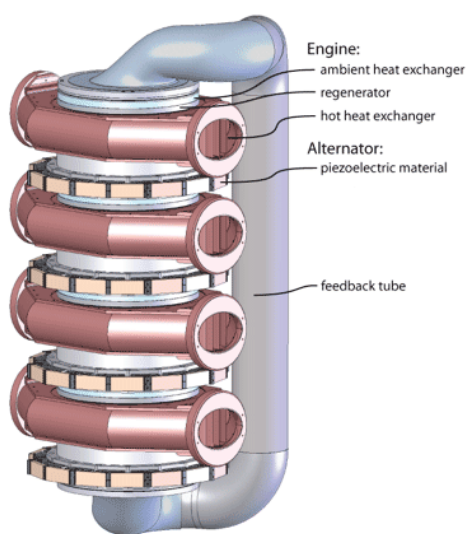
Rys.20. Generator membranowy [1]

Inne konstrukcje generatorów wykorzystują zjawisko piezoelektryczne. Prace nad nimi są prowadzone między innymi w Pennsylvania State University, Washington State University, Los Alamos National Laboratory, NASA i w wielu innych znanych ośrodków naukowych. Istotne są prace nad doskonaleniem materiałów, z których wytwarza się przetworniki piezoelektryczne. Prace nad nowymi materiałami takimi jak fluorek poliwinyloideny są prowadzone między innymi przez Washington State University [2].

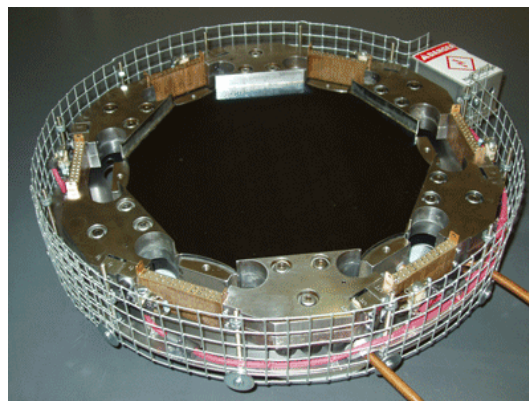
Do celów rekuperacji energii cieplnej z gazów spalinowych zastosowany został układ termoakustycznego silnika Stirlinga z falą biegnącą wykorzystujący zjawisko piezoelektryczne. Konstrukcja przedstawiona na rys.21 i 22 została opracowana przy współpracy ośrodków Clean Power Resources Inc., Pennsylvania State University, Applied Research Laboratory, Los Alamos National Laboratories, Volvo i Mack Trucks.

Regenerator składa się z czterech oddzielnych modułów zawierających silniki termoakustyczne i generatory piezoelektryczne w pionowej konfiguracji. Jako czynnik roboczy został zastosowany hel. Przemieszczająca się fala akustyczna, przy pomocy elastycznej membrany, wywiera nacisk na elementy piezoelektryczne rozmieszczone obwodowo. Przepływ gazów spalinowych przez wymienniki ciepła jest tak rozdzielony, aby między poszczególnymi modułami było przesunięcie fazowe o 90°.

Regenerator ten jest obecnie przedmiotem badań, a jego sprawność konwersji energii cieplnej na elektryczną jest oceniana na 20%, przy temperaturze górnego źródła ciepła wynoszącej 427 °C.



Rys.21. Regenerator termoakustyczny wykorzystujący zjawisko piezoelektryczne.[3]



Rys.22. Moduł z elementami piezoelektrycznymi z regeneratora termoakustycznego. [3]

## 5. Wnioski

Opracowywane i częściowo wdrażane metody odzysku energii oparte na wykorzystaniu teoretycznych obiegów Rankine'a, Ericssona i Stirlinga pozwalają na odzyskiwanie energii cieplnej z silników spalinowych pojazdów. Rozwój tych metod może doprowadzić do możliwości wykorzystania strumienia ciepła niskotemperaturowego, pochodzącego od czynnika chłodzącego silnik. Równocześnie większy zakres temperatury pracy urządzeń wykorzystujących wymienione obiegi, pozwoli na zwiększenie sprawności silnika. W konstrukcji opartej o budowę silnika termoakustycznego nie występują ruchome elementy poza elementami drgającymi, co wpływa na zwiększenie sprawności mechanicznej. Wydaje się, że jednym z najważniejszych czynników będących przedmiotem intensywnych badań i mogących przyspieszyć rozwój tych urządzeń są osiągnięcia w dziedzinie inżynierii materiałowej, które pozwolą na budowę nowej generacji przetworników piezoelektrycznych.

## Bibliography/Literatura

- [1] Backhaus S.N., Yu Z., Jaworski A.J. „Design of a Low-Cost Thermoacoustic Electricity Generator and Its Experimental Verification” 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis Istanbul, Turkey 7/12/2010
- [2] Brian A., Wekin E. „Characterization and Comparison of Piezoelectric Materials for Transducing Power from a Thermoacoustic Engine” Washington State University August 2008 August 2008
- [3] CPR Clean Power Resources, Inc. „The Thermoacoustic Alternator” [http://cleanpowerresources.com/content.php?sub\\_section=thermoenergyconversion&name=the\\_thermoacoustic\\_alternator](http://cleanpowerresources.com/content.php?sub_section=thermoenergyconversion&name=the_thermoacoustic_alternator)
- [4] Department of Energy by Jet Propulsion Laboratory „Utilization of Waste Heat in

---

Trucks for Increased Fuel Economy”  
California Institute of Technology Pasadena,  
California May 1 1978

- [5] Energy Conversion and Management Volume 51, Issue 2, February 2010, Pages 350–359
- [6] Hu Z. J., Li Q., Li Z. Y. „A high frequency cascade thermoacoustic engine” *Cryogenics* Volume 46, Issue 11, November 2006, Pages 771–777
- [7] Nelson Ch. R. „Exhaust Energy Recovery” DEER Conference August 24th, 2006
- [8] Obieglo A., Ringler J., Seifert M., Hall W. „Future Efficient Dynamic swith Heat

Recovery „Directions in Engine Efficiency and Emission Research Conference Cambridge 5. August 2009

- [9] Proeschel R. „Proe HRPG Heat Recovery Power Generator” HRPG Brochure [http://www.proepowersystems.com/HRPG\\_Brochure.pdf](http://www.proepowersystems.com/HRPG_Brochure.pdf)
- [10] Toom R., Thévenod F. „Heat to power conversion benchmark” heat2power SARL Paris – France

---

Mr Śliwiński Krzysztof, DEng. –doctor in the Faculty of Institute of Automobiles and Internal Combustion Engines at Cracow University of Technology.

*Dr inż. Krzysztof Śliwiński - adiunkt na Wydziale Mechanicznym Politechniki Krakowskiej.*

