

Energy recovery systems in the automotive vehicles

Abstract: Currently used systems for energy recovery from thermal machines primarily use mainly the two sources of energy. The first is the kinetic energy of the exhaust gases, and second heat carried away with the exhaust gas and returned to the cooling system. In order to convert this waste energy to useful work or electric current the devices using different physical phenomena are used. The most widely used systems of this type utilizes the kinetic energy of the exhaust gas in turbochargers. In the more technically advanced systems waste heat is utilized to change it to electric energy with use of for example the Seebeck effect, piezoelectric phenomena or thermochemical phenomena. The article discusses recovery systems of waste energy from the vehicle's engine, using equipment such as turbines, TEG (Thermoelectric Generator) or TPV (Thermophotovoltaic cell).

Keywords: recuperation, thermoelectric generator, thermophotovoltaic cell

Układy rekuperacji energii w pojazdach samochodowych

Streszczenie: Stosowane obecnie układy odzysku energii z maszyn cieplnych wykorzystują głównie dwa źródła energii. Pierwszym z nich jest energia kinetyczna spalin, a drugim energia cieplna unoszona ze spalinami i oddawana do układu chłodzenia. W celu zamiany tej odpadowej energii na pracę użyteczną lub prąd elektryczny stosowane są urządzenia wykorzystujące różne zjawiska fizyczne. Najszerszej stosowane układy tego typu wykorzystują energię kinetyczną spalin w turbosprężarkach. W bardziej zaawansowanych technicznie systemach wykorzystuje się odpadową energię cieplną, zamieniając ją na energię elektryczną korzystając np. z efektu Seebecka, zjawisk piezoelektrycznych lub zjawisk termochemicznych. W artykule zostały omówione układy odzysku odpadowej energii z silnika pojazdu, za pomocą takich urządzeń jak: turbina, generator termoelektryczny TEG (Thermoelectric Generator) lub ogniwo termo-foto-woltaiczne TPV (Thermophotovoltaic).

Słowa kluczowe: rekuperacja, generator termoelektryczny, ogniwo termo-foto-woltaiczne

1. Wstęp

Rekuperacja energii, czyli pochodzący od łacińskiego słowa *recuperatio* „odzysk”, odnosi się najczęściej do wykorzystywania odpadowej energii. Jest to zwykle energia w postaci ciepła, pochodząca z procesów przemysłowych lub odpadowa energia z układu chłodzenia i spalin z maszyn cieplnych. Może to być również energia w innej postaci np. energia kinetyczna hamującego pojazdu.

W niektórych pojazdach trakcyjnych, takich jak np. lokomotywy spalinowe lub pojazdy z hybrydowymi układami napędowymi, odzysk energii dokonuje się najczęściej przy pomocy maszyn elektrycznych (trakcyjnych silników asynchronicznych). W trakcie hamowania pojazdu następuje przekształcenie energii kinetycznej rozprężonej masy pojazdu, na energię elektryczną. Następuje wówczas przełączenie trybu pracy maszyny elektrycznej z silnikowej, na prądnicową. W silniku spalinowym istnieją dwa rodzaje energii odpadowej, które można wykorzystać w praktyce: są nimi energia cieplna i kinetyczna. Energia cieplna jest emitowana zarówno przez układ chłodzenia silnika jak i przez gazy wylotowe, natomiast energia kinetyczna pochodzi od strumienia spalin w układzie wylotowym. Obecnie

stosowane jak i nowo opracowywane układy rekuperacji energii wykorzystują obydwa jej źródła. Od dawna stosowane jest wykorzystanie energii kinetycznej spalin, która jest zamieniana na pracę mechaniczną przez zastosowanie turbosprężarki, powodującą zwiększenie ciśnienia powietrza doprowadzanego do silnika. Bardziej zaawansowane układy stosowane w pojazdach zamieniają energię kinetyczną spalin na mechaniczną lub elektryczną. Należą do nich Mechanical Turbo-Compounding, Electrical Turbo Compounding, czy też system TIGERS- (Turbo Generator Integrated Gas Energy Recovery). Równocześnie opracowywane i stosowane są urządzenia wykorzystujące odpadową energię cieplną. Przykładami takich rozwiązań są: generator termoelektryczny TEG (Thermoelectric Generator) czy konwersja termo-foto-woltaiczna TPV (Thermophotovoltaic).

2. Układy wykorzystujące energię kinetyczną spalin

2.1. „Mechanical Turbo-Compounding”

Pierwsza grupa urządzeń zamienia energię kinetyczną spalin na energię mechaniczną. Do tej grupy można zaliczyć rozwiązania firm Scania i Volvo, występujące pod nazwą *Mechanical Turbo-*

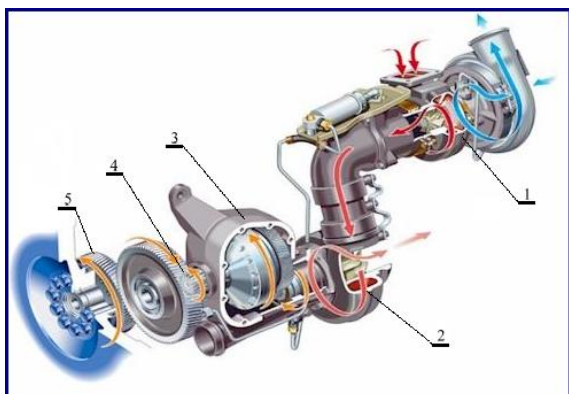
Compounding. W przybliżeniu można określić, że ilość energii kinetycznej odebranej w tych urządzeniach ze strumienia spalin, jest porównywalna z energią odbieraną przez turbosprężarkę.

Układ firmy Scania (rys. 1), odzyskuje energię spalin za pomocą turbiny i poprzez przekładnię przekazuje ją na wał silnika. Układ ten, zainstalowany za klasyczną turbosprężarką (1), jest odrębnym elementem w układzie wylotowym silnika.

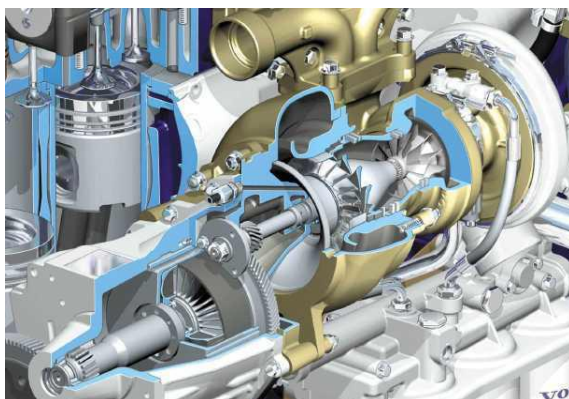
W tym układzie turbina napędowa (2) jest sprzężona z zębatą, dwustopniową przekładnią redukcyjną prędkości obrotowej (5), umieszczoną na wale głównym silnika za pośrednictwem sprzęgła hydrokinetycznego (3) i przekładni (4), której zadaniem jest zmniejszenie prędkości obrotowej.

Prędkość obrotowa turbiny napędowej może w tym przypadku osiągać wartość do 55 000 1/min.

Na podobnej zasadzie zbudowany jest układ firmy Volvo (rys. 2) stosowany w silniku D12D o mocy 500 kW. W tym rozwiązaniu również zastosowano odrębne turbiny, jedną do napędu sprężarki doładowującej silnik, drugą do zamiany energii kinetycznej gazów spalinowych na mechaniczną. W konstrukcji firmy Volvo obydwie turbiny zostały umieszczone we wspólnej obudowie.



Rys. 1. Schemat układu „turbocompound” firmy Scania[12]



Rys. 2. Przekrój układu „turbocompound” firmy Volvo[7]

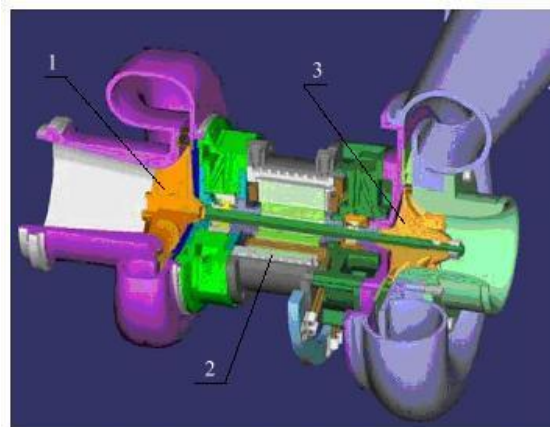
W tych rozwiązaniach możliwe jest odzyskanie ok. 20% energii gazów wylotowych. W związku z zainstalowaniem dodatkowego urządzenia, w przewodzie wylotowym następuje wzrost oporów przepływu. Zwiększenie przeciwcisnienia w układzie wylotowym powoduje zwiększenie pracy wymiany ładunku oraz wzrost współczynnika reszty spalin. Zjawisko to powoduje wewnętrzną recyrkulację spalin, która w warunkach maksymalnego obciążenia silnika powoduje zmniejszenie jego mocy.

Na wartość odzysku energii również ma wpływ sprawność przekładni, która w przypadku urządzenia firmy Volvo zmniejsza prędkość obrotową z 70.000 1/min, uzyskiwanych przez turbinę, do maksymalnej prędkości obrotowej wału korbowego, wynoszącej 1800 1/min.

Wynika z tego, że do określenia całkowitego przyrostu energii użytecznej, od energii odzyskanej przez turbinę należy odjąć energię straconą w opisanych wyżej procesach. Bilans energetyczny całego systemu wskazuje na wzrost sprawności ogólnej ok. 5% i wzrost mocy ok. 10% [7].

2.2. Electrical Turbo-Compounding

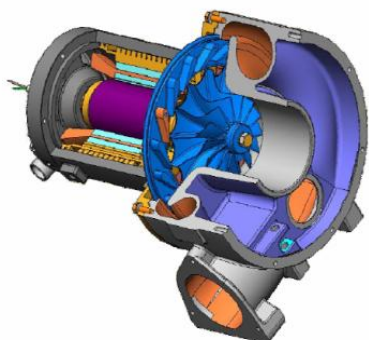
W rekuperatorach, zamieniających energię kinetyczną spalin na energię elektryczną, wyróżnić można dwa rodzaje konstrukcji. W jednej z nich turbina pracująca w strumieniu gazów spalinowych przekazuje część ich energii kinetycznej zarówno do generatora prądu, jak i na wirnik sprężarki. W drugim, turbina służy wyłącznie do napędu generatora. Przykładem pierwszego rozwiązania jest urządzenie „Electrical Turbo-Compounding” firmy Caterpillar. Na rys. 3 przedstawiony jest jego schematyczny przekrój. W tym układzie generator prądu (2) jest zamontowany pomiędzy turbiną (1) a sprężarką (3).



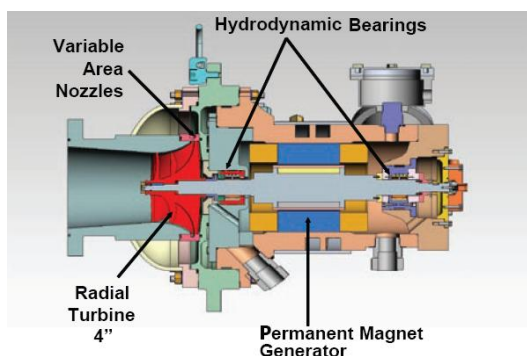
Rys. 3. Układ firmy Caterpillar o nazwie Turbo-Compounding [11]

Przykładem konstrukcji, która stanowi odrębny element montowany w układzie wylotowym silnika, w której turbina służy wyłącznie do napędu generatora, jest urządzenie o nazwie elektro Turbo-Compounding z firmy John Deere (rys. 4.).

Podobnym rozwiązaniem jest turbogenerator firmy Cummins (rys. 5).

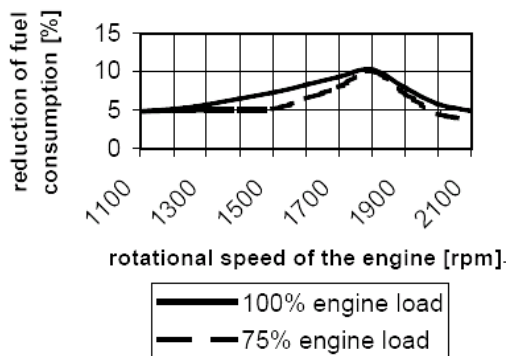


Rys.4. Układ Turbo-Compounding firmy John Deere [12]

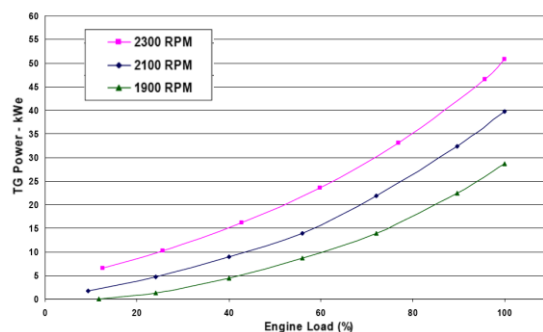


Rys. 5. Schemat turbogenerators firmy Cummins [9]

Na rys. 6 przedstawiono wykres ilustrujący dane dotyczące zmniejszenia zużycia paliwa przez silnik, przez zastosowanie układu Turbo-Compounding firmy Caterpillar. Według danych producenta zmniejszenie zużycia paliwa wynosi od 3 do 5% w zakresie małej prędkości obrotowej silnika i aż 10%, dla dużej wartości prędkości obrotowej [11]. Na charakterystyce turbogenerators firmy Jon Deere (rys. 7) widać wzrost sprawności w miarę zwiększania prędkości obrotowej i obciążenia silnika, podobnie jak dla przypadku układu firmy Caterpillar [12].

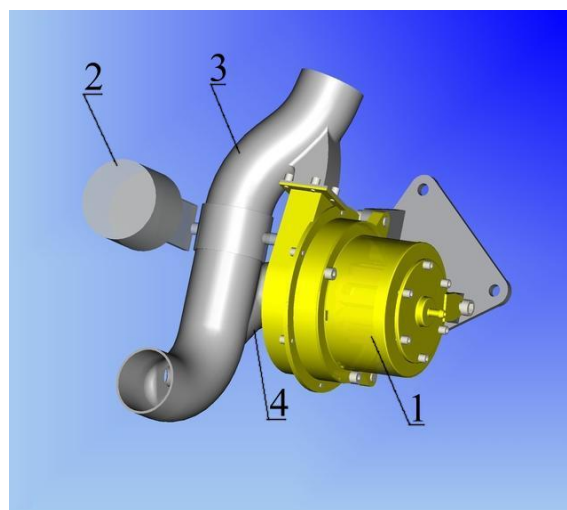


Rys. 6. Zmniejszenie zużycia paliwa w funkcji prędkości obrotowej silnika [11]



Rys. 7. Moc turbogenerators firmy John Deere w funkcji obciążenia silnika [12]

Interesującym rozwiązaniem jest koncepcja firmy Caterpillar, w której zastosowano podwójne wykorzystanie układu typu Turbo-Compounding. W okresie pracy silnika z dużym obciążeniem następuje odbiór energii spalin przez generator prądu. W okresie, kiedy masa spalin jest zbyt mała do zapewnienia właściwego ciśnienia doładowania, generator prądu zaczyna pracować jako silnik elektryczny, wspomagając doładowanie silnika. System „TIGERS” (rys. 8), opracowywany w firmie Visteon UK Ltd. jest rozwiązaniem, które również działa na zasadzie zamiany energii kinetycznej spalin na prąd elektryczny. Charakterystyczną cechą tego rozwiązania jest umieszczenie turbiny generatora prądu (1) w kanale spalinowym (4), który jest równoległy do głównego, a nie w głównym przewodzie spalinowym (3), jak to jest stosowane w poprzednich rozwiązaniach. Spaliny w zależności od stanu pracy silnika mogą być kierowane za pomocą regulatora (2) na turbinę generatora lub bezpośrednio do wylotu.



Rys. 8. Schemat układu „TIGERS” [6]

Zadaniem regulatora jest przełączanie zaworu, kierującego spaliny do turbiny, kiedy parametry spalin osiągną wymaganą wartość: masowe natężenie przepływu powyżej 0,05 kg/s, prędkość

powyżej 60m/s i średnia temperatura spalin ok. 800 °C. Takie parametry przepływających spalin pozwalają na osiągnięcie prędkości obrotowej turbiny ok. 80.000 1/min, zamieniając w generatorze energię spalin na prąd elektryczny o mocy powyżej 6 kW. Rekuperator ten pozwala na zmniejszenie zużycia paliwa o ok. 5-10% [6].

3. Układy wykorzystujące energię ciepłą spalin

3.1. Generator termoelektryczny

Efekt Peltiera znany jest już od 1834 r. Budowa modułu wykorzystującego ten efekt oparta jest o elementy półprzewodnikowe typu „p” i „n” wykonane z tellurku bizmutu domieszkowanego antymonem i selenem. Elementy te umieszczone są pomiędzy dwoma płytkami ceramicznymi. W czasie przepływu prądu elektrony przemieszczają się od półprzewodnika typu „n”, w którym występuje nadmiar elektronów, do „p”, gdzie jest niedostateczna liczba elektronów, stając się ładunkami nadmiarowymi. Wychodząc na wyższy poziom energetyczny zwiększają swoją energię kosztem energii cieplnej z otoczenia. Kiedy prąd płynie w odwrotnym kierunku elektrony obniżają poziom energetyczny, co powoduje wydzielenie ciepła. Dzięki pobieraniu i wydzieleniu ciepła przez elektrony można uzyskać zjawisko transferu ciepła pomiędzy zewnętrznymi płytkami ceramicznymi.

W związku z tą właściwością ogniwa te od dawna są wykorzystywane jako pompy ciepła w procesach i urządzeniach chłodzących wymagających precyzyjnej regulacji temperatury.

W urządzeniach służących do rekuperacji energii cieplnej wykorzystuje się efekt odwrotny do efektu Peltiera, nazywany zjawiskiem Seebecka, występujący i wykorzystywany do pomiaru temperatury za pomocą termopar. Na skutek istniejącej różnicy temperatury po obydwu stronach ogniwa następuje generowanie siły elektromotorycznej. Sprawność układu jest iloczynem sprawności obiegu Carnota (2) i sprawności półprzewodnika (3) zależną od jego własności materiałowych i od różnicy temperatury [8].

$$\varepsilon = \varepsilon_C \cdot \varepsilon_M \quad (1)$$

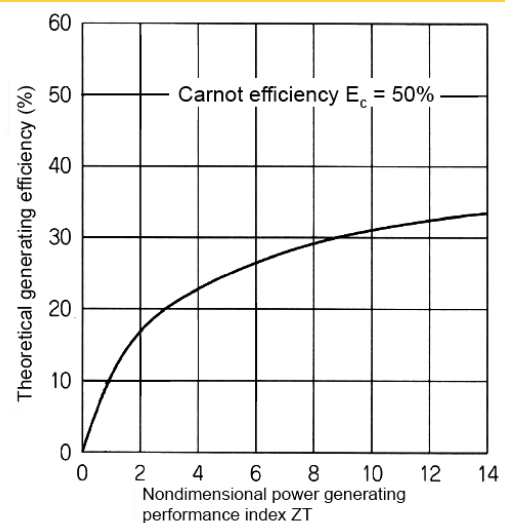
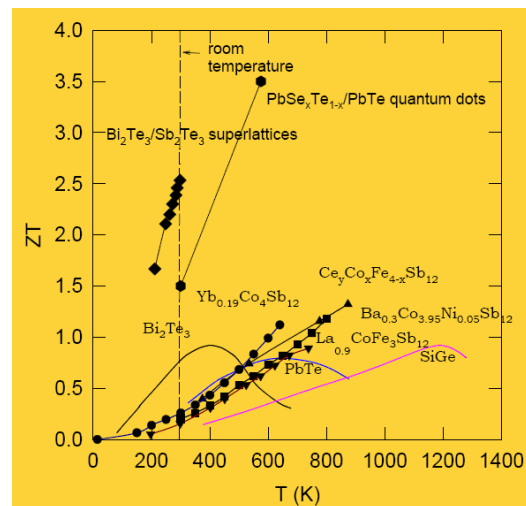
$$\varepsilon_C = \frac{T_H - T_C}{T_H} \quad (2)$$

$$\varepsilon_M = \frac{\sqrt{1+ZT} - 1}{\sqrt{1+ZT} - \frac{T_C}{T_H}} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{T_H - T_C}{T_H} \cdot \frac{\sqrt{1+ZT} - 1}{\sqrt{1+ZT} - \frac{T_C}{T_H}} \quad (4)$$

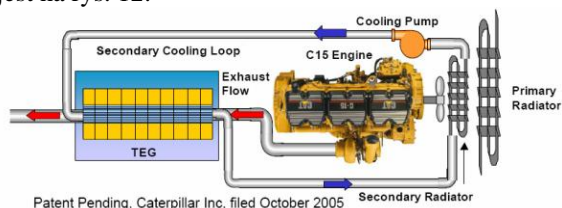
gdzie: T_H - temperatura górnego źródła energii,
 T_C - temperatura dolnego źródła energii,
 ZT - współczynnik zależna od własności półprzewodnika i temperatury.

Na wykresie na rys. 11 pokazano zależność współczynnika ZT w funkcji temperatury oraz wpływu jego wartości na sprawność układu. Widoczny jest wzrost sprawności układu w miarę wzrostu współczynnika ZT . W latach 90-tych powstały materiały, które w znaczący sposób pozwoliły na wzrost sprawności układu wykorzystującego zjawisko Seebecka. Dzięki temu wzrosło zainteresowanie zastosowaniem tego systemu do rekuperacji energii w pojazdach samochodowych.



Rys. 11. Zależność współczynnika materiałowego ZT w funkcji temperatury oraz wpływ jego wartości na sprawność układu [8, 11]

Wiele znanych firm zajmuje się tym zagadnieniem. Jednym z przykładów jest rozwiązanie zespołu firm Caterpillar, Department of Energy USA, Pratt&Whitney i innych, którego schemat TEG Thermoelectric Generator pokazany jest na rys. 12.



Rys. 12. Schemat układu TEG firmy Caterpillar [11]

Rozwiązanie to pozwoliło na wykorzystanie 17% energii spalin, co przyniosło efekt w postaci 4,5 do 6% zmniejszenia zużycia paliwa [11].

Przykładem innej realizacji jest projekt zespołu firm: BMW, Visteon, BSST, NASA, którego efektem jest instalacja odzysku energii w samochodzie marki BMW 530i (rys. 13).



Rys.13. Układ z ogniwem termoelektrycznym BMW 530i [4]

Dzięki zastosowaniu tego systemu zmniejszono zużycie paliwa o 2% a przewiduje się dalsze zwiększenie do 5% [1].

Nad podobnymi rozwiązaniami również pracują takie firmy jak MG, Volkswagen, Delhi i inne. Zgodnie z raportem w International Thermoelectric Society, specjaliści z firmy Volkswagen twierdzą, że w warunkach jazdy po autostradzie można otrzymać 600 W energii w wyniku rekuperacji energii przez generator termoelektryczny, co odpowiada około 30% zapotrzebowania pojazdu na energię elektryczną. W wyniku tego zostaje zmniejszona praca mechaniczna pobierana przez alternator, dając efekt w postaci zmniejszenia zużycia paliwa o więcej niż 5% [5].

Postęp w wytwarzaniu materiałów na ogniwa termoelektryczne, pozwalające na zwiększenie sprawności samych ogniw, dokonał się w ostatnich latach. W związku z tym prace nad wdrożeniem konkretnych rozwiązań do pojazdów są cały czas prowadzone i jak dotąd nie są one stosowane na szerszą skalę.

3.2. Układ wykorzystujący konwersję termofotowoltaiczną

Termofotowoltaiczna konwersja (*Thermophotovoltaic* TPV) jest bezpośrednią zamianą energii cieplnej na energię elektryczną. Zjawisko jako pierwszy odkrył A. Becquerel w 1839 r. Polega ono na powstaniu siły elektromotorycznej w ciele stałym pod wpływem promieniowania świetlnego. Początkowo ogniwa fotowoltaiczne, których struktura oparta była na krzemie, były wykorzystywane do konwersji światła słonecznego na prąd elektryczny. W Uniwersytecie Massachusetts (MIT) opracowano micro-TPV generator służący do konwersji energii, pochodzącej z innych źródeł ciepła. Podstawowy system składa się ze źródła ciepła i fotodiody półprzewodnikowej. Urządzenia wykorzystujące konwersję termofotowoltaiczną mogą pracować w różnej temperaturze źródła ciepła w zależności od systemu, zazwyczaj jest to temperatura od 900-1300 °C. Dla takiej wartości temperatury promieniowanie ma częstotliwość podczerwieni lub jest bliskie podczerwieni. Fotodiody absorbują wypromieniowane fotony, w rezultacie tego powstają w nich wolne elektrony. Jedną z najważniejszych cech świadczących o sprawności diody fotowoltaicznej jest jej stopień konwersji fotonów na energię elektryczną. W związku z tym w różnych instytucjach prowadzone są prace nad materiałami służącymi do budowy diody fotowoltaicznej. Obecnie są stosowane związki zawierające: gal, antymon, ind, arsen, german, takie jak GaSb, GaInAsSb, InGaAs oraz Ge [2].

W Western Washington University został zbudowany pojazd „Viking 29”, którego źródłem energii jest gaz ziemny spalany w palniku w sposób ciągły. Energia promieniowania cieplnego zamieniana jest na elektryczną przez generator TVP o mocy 10 kW, zbudowany na bazie arsenku galu. Energia ta jest gromadzona w akumulatorze [3].

Trwają obecnie prace nad zastosowaniem tej technologii w zastosowaniu do rekuperacji energii pochodzącej ze spalin silnika samochodowego [10].

4. Wnioski

Przedstawione układy rekuperacji energii odzyskują zarówno energię kinetyczną jak i cieplną, a ich zastosowanie powoduje zwiększenie sprawności źródła napędowego. Zasadniczym problemem związanym z odzyskiwaniem energii cieplnej silnika jest gęstość strumienia energii, którą możemy wykorzystać w układach odzysku.

Z tego powodu w silniku spalinowym korzystamy głównie z energii cieplnej spalin, ponieważ w przypadku tego źródła dysponujemy dużym gradientem temperatury pomiędzy spalinami a otoczeniem. Istniejące obecnie systemy pozwalają niestety na wykorzystanie tylko części energii cieplnej gazów spalinowych.

W opisanych rozwiązaniach, głównym celem badań jest poszukiwanie materiałów pozwalających na odzysk energii ze źródeł o mniejszej różnicy temperatury. Ważnym aspektem w tych poszukiwaniach jest analiza ekonomiczna, która nie pozwala na stosowanie zaawansowanych i drogich technologii, wpływających w znacznym stopniu na cenę całego pojazdu. Z tego powodu większość prowadzonych prac zmierza do wykorzystania

energii cieplnej gazów spalinowych, czego uzasadnieniem jest: brak ujemnego wpływu zmniejszenia temperatury gazów spalinowych na przebieg procesu spalania, większa trwałość urządzeń ze względu na brak części ruchomych i mały koszt urządzenia.

Bibliography/Literatura

- [1] BMW Corporate Communications „BMW Efficient Dynamics means ongoing research. Exhaust heat offers the greatest potential for the future” Media Information 28 August 2011
- [2] Chan W., „Towards a High-Efficiency Micro-Thermophotovoltaic Generator” Massachusetts Institute of Technology June 2010
- [3] Christ S., Seal M., „Viking 29 - A Thermophotovoltaic Hybrid Vehicle Designed and Built at Western Washington University” SAE Technical Paper 972650/1997
- [4] Energy.gov, „Could TEG Improve Your Car's Efficiency?” <http://energy.gov/articles/could-teg-improve-your-cars-efficiency> August 16, 2010
- [5] Evans P. “Thermoelectrics to replace car alternators and improve” Gizmag February 8, 2009
- [6] Green Car „TIGERS Exhaust Gas to Electricity for Reductions in Fuel Consumption” Congress 21 September 2005 http://www.greencarcongress.com/2005/09/tigers_exhaust
- [7] Greszler A., „Diesel Turbo-compound Technology” ICCT/NESCCAF Workshop Improving the Fuel Economy of Heavy-Duty Fleets II, 20 February 2008
- [8] Kawamoto H., „R&D Trends in High Efficiency Thermoelectric Conversion Materials for Waste Heat Recovery” Science & Technology Trends Quarterly Review No.30 January 2009
- [9] Nelson Ch. R. „Exhaust Energy Recovery” DEER Conference August 24th, 2006
- [10] Sathish Krishna R., Subakar S.E. „Waste heat harnessing in automobiles for on-board auxiliary power generation using thermophotovoltaics” Sustainable Energy Technologies (ICSET), 2010 IEEE International Conference, INSPEC Accession Number: 11744459
- [11] Toom R., Thévenod F., „Heat to power conversion benchmark” heat2power SARL Paris - France
- [12] Vuk C. T. „Turbo Compounding” John Deere Moline Technical Center 25 Aug, 2005

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.

