

STUDIUM PORÓWNAWCZE SPOSOBÓW ODZYSKU ENERGII W POJEŹDZIE DROGOWYM

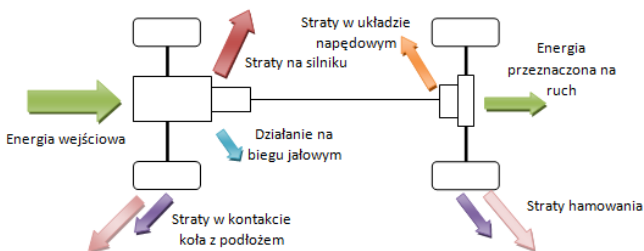
W artykule przedstawiono studium porównawcze różnych sposobów odzysku energii w pojeździe drogowym wraz z omówieniem wymagań stawianych przed takimi systemami oraz analizą poszczególnych technologii w kontekście wymienionych parametrów.

WSTĘP

Szybki rozwój cywilizacji nierozzerwalnie łączy się ze zwiększaniem zapotrzebowania energetycznego. Zjawisko to dotyczy wielu dziedzin oraz obszarów geograficznych, w szczególności krajów wysoko rozwiniętych, uzależnionych w coraz większym stopniu od wszelkiego rodzaju technologii, a także obszarów uznawanych za rozwijające się, które w ogromnym tempie, często bezkompromisowo, gonią czołówkę świata. Niestety, wciąż większość energii produkowana jest z różnego rodzaju paliw kopalnych, które uznawane są, z braku odpowiednich technologii syntezy, za nieodnawialne, a wręcz wyczerpywalne w niedalekiej przyszłości. Nie dziwi zatem koncentracja wysiłków nad zwiększeniem udziałów energii odnawialnej (uwzględniając prace nad nowymi rozwiązaniami) w ogólnej jej produkcji. Z drugiej strony, również, a może przede wszystkim, ze względów ekonomicznych ukierunkowuje się rozwój inżynierii na konstrukcje coraz bardziej energetycznie efektywne i oszczędne. Takie działania wymuszają też regulacje prawne, podążające za proekologicznymi trendami.

1. STRATY ENERGII W POJAZDACH

Skala zjawiska transportu, tak publicznego jak i cargo, plasuje go w czołówce procesów w kategorii zużycia energii. Należy również zauważyć, iż ze względu na przewagę spalinowych technologii napędowych jest to wyjątkowo mało efektywne jej wykorzystanie. Taka sytuacja jest przyczyną wielu prac badawczo-rozwojowych przebiegających dwubiegowo: zwiększenie sprawności konwencjonalnych urządzeń oraz opracowanie nowych technologii (taki podział jest najbardziej prawdziwy dla układów napędowych). Dotyczy to zarówno pojazdów drogowych czy statków powietrznych. Poniższy schemat prezentuje przepływ energii w samochodzie.



Rys. 1. Przepływ energii w samochodzie (działanie na biegu jałowym aktualne dla silnika spalinowego)

Do rzeczywistego napędu samochodu spalinowego wykorzystywane jest jedynie ok. 16-18% energii chemicznej, zgromadzonej w paliwie, co jest jednoznaczne z jego całkowitą sprawnością. Nie może dziwić, iż powrót pojazdów napędzanych elektrycznie, jest przyjmowany z tak dużą aprobatą (sprawność samochodu elektrycznego ok. 75%, nie uwzględniając strat przy ładowaniu pojazdu). Jednak wg szacunków pojazdy konwencjonalne stanowią większość na światowym rynku do 2065-2070 roku. W krajach rozwijających się ten przełom nastąpi z pewnością jeszcze później. Część strat energii w samochodzie nie wiąże się bezpośrednio z wybraną technologią napędową, a jego ogólną koncepcją jako maszyny. Straty energii (kolorem niebieskim zaznaczono straty dotyczące jedynie pojazdów z silnikami wewnętrznego spalania):

- sprawność silnika (ciepło, energia spalin),
- sprawność układu przeniesienia napędu (przekładnie, kontakt koła z podłożem),
- straty w procesie hamowania.

Najczęściej straty energii rozpatrujemy w kontekście wymiany ciepła lub działania tarcia. Jednak przejmowanie energii w pojeździe nie zawsze musi się wiązać z jej odzyskiwaniem. Ciekawym przykładem jest zawieszenie rekuperacyjne gdzie przejmowana energia pochodzi od podłoża (zmiana wysokości).

2. PORÓWNIANIE METOD ODZYSKU ENERGII

Bieżące trendy oraz dość długa historia motoryzacji sprawiają, iż szczęśliwie na każdą drogę strat energii przypada więcej niż jeden pomysł jej odzysku. Oczywiście różnice w dojrzałości poszczególnych technologii oraz różne „punkty przyłożenia” nie pozwalają na bezpośrednie porównanie wszystkich koncepcji układów ERS. Warto wspomnieć, iż pierwsze pomysły dotyczące odzysku energii oraz zauważenie problemu strat energetycznych przypadają na wiek XIX, a więc początek rozwoju tej gałęzi przemysłu. Porównując działanie, najbardziej obiektywnym parametrem porównawczym jest całkowity bilans energetyczny – stosunek ilości energii odzyskanej (ponownie wykorzystanej) do wzrostu spalania pojazdu, w którym dany układ zainstalowano, powstałego w skutek zwiększenia masy w ruchu. Bilans zależy od masy samego układu oraz jego sprawności. Wpływ na jego wartość ma również charakterystyka danego pojazdu (poprzez różnicę w spalaniu w funkcji dodanej masy). Sprawia to, iż nie można w ten sposób porównać technologii w oderwaniu od maszyny, w której jest ona implementowana.

Producenci oraz badacze, zajmujący się omawianą tematyką, używają do porównań jeszcze dwóch uniwersalnych parametrów: gęstość energetyczna (stosunek pojemności energetycznej wzglę-

dem masy urządzenia), gęstość mocy (wyraża możliwości przyswojenia/oddania energii w określonym czasie względem masy urządzenia). Jednak żaden z tych parametrów, samodzielnie oraz w oderwaniu od sprawności całego cyklu, nie pozwala na jednoznacznie ocenę systemu. Dodatkowo, nie bez znaczenia pozostają takie cechy jak cena urządzenia, która po uwzględnieniu całkowitego bilansu energetycznego pozwala na jego ocenę w wymiarze ekonomicznym. Poza tym uwzględnić należy możliwości instalacyjne w pojeździe (zwłaszcza w przypadku układów akcesoryjnych) oraz trwałość i serwisowanie.

Opisany koniekt obrazuje jak trudnym lub wręcz niemożliwym jest bezpośrednie zestawienie porównawcze technologii odzysku energii, zwłaszcza w oderwaniu od konkretnego pojazdu.

3. SPOSOBY ODZYSKU ENERGII

Stosować można wiele podziałów sposobów odzysku energii np. ze względu na źródło czy technologię gromadzenia energii.

W celu zestawienia stworzono tabelę złożoną z kilku parametrów: dojrzałość technologii, stopień skomplikowania, sprawność, ilość energii do przejęcia.

1. Energia cieplna

Właściwie cała energia transferowana poza system (pojazd w ruchu) do środowiska przekazywana jest ostatecznie w formie ciepła. Co daje ogromny potencjał układom odzysku tej właśnie formy energii. Jak zauważono w poprzednich akapitach istnieje wiele potencjalnych źródeł odzysku energii cieplnej w pojeździe jak np. silnik, tarcze hamulcowe lub spaliny, dla silników ICE. W przypadku napędu spaliny, średnio 60% energii chemicznej paliwa jest zamienianych w ciepło i energię kinetyczną spalin już w samym sercu układu napędowego pojazdu. Warto jednak zauważyć, iż straty ciepłe są uniwersalne i dotyczą w pewnym stopniu alternatywnych technologii jak np. pojazdów elektrycznych. W najbliższych latach należy spodziewać się intensyfikacji prób implementacji technologii odzysku energii cieplnej ze względu na przepisy wymuszające odzysk ciepła w mistrzostwach F1. Wielu producentów interesuje się potencjałem takich rozwiązań jak np. BMW.

Tab. 1. Potencjał układów TERS

Potencjał	<ul style="list-style-type: none"> •technologia uniwersalna (straty ciepłe dotyczą wszystkich/większości systemów mechanicznych) •wiele źródeł strat w pojeździe, duże ilości energii, szczególnie w przypadku silników ICE
-----------	---

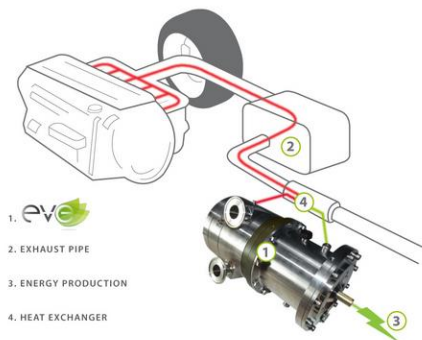
Zastosowanie rurek cieplnych pozwala na przejmowanie oraz transfer ciepła z wysokim stopniem sprawności. Co oznacza, iż potencjalnie możliwe jest zgromadzenie energii cieplnej z wielu źródeł w centralnej jednostce zbiorczej.

a) Wymienniki ciepła- obieg Rankin'a

Energię cieplną można wykorzystać do przemiany fazowej czynnika roboczego - powstanie pary pod ciśnieniem, którą można wykorzystać do wytworzenia momentu przykładanego bezpośrednio do układu napędowego lub do produkcji energii elektrycznej.

Tab. 2. Cechy układów TERS z wymiennikami ciepła

Sprawność	<ul style="list-style-type: none"> •niska (przemiana ciepła na energię pary ok. 40%, sprawność urządzenia roboczego przekształcającego energię pary na energię mechaniczną lub elektryczną) •ogólna deklarowana oszczędność paliwa 5%
Dojrzałość technologii	<ul style="list-style-type: none"> •istniejące, gotowe rozwiązania
Stopień złożoności	<ul style="list-style-type: none"> •zależny od rozwiązania przekazywania energii (urządzenia robocze: dodatkowa turbina, silnik, generator)



Rys. 2. Przykład urządzenia wykorzystującego obieg Rankin'a (silnik tłokowy sprzężony z generatorem elektrycznym)

b) Materiały termoelektryczne

Generatory termoelektryczne pozwalają na wytworzenie prądu przy różnicy temperatur na ich końcach. Prowadzone są badania zarówno nad przejmowaniem energii cieplnej spalin jak i zastąpieniem klasycznego radiatora w silniku spalinowym przez układ termoelektryczny.

Tab. 3. Cechy układów TERS z zastosowaniem materiałów termoelektrycznych

Sprawność	<ul style="list-style-type: none"> •niska (obecne generatory termoelektryczne wykazują sprawność ok. 5%) •sprzężenie generatorów termoelektrycznych z rurkami cieplnymi pozwala na zwiększenie sprawności
Dojrzałość technologii	<ul style="list-style-type: none"> • opracowane konstrukcje prototypowe, prace nad rozwojem technologii •poszukiwanie nowych materiałów termoelektrycznych
Dodatkowy potencjał	<ul style="list-style-type: none"> •opracowanie sprawnych materiałów termoelektrycznych, o odpowiednich właściwościach strukturalnych może pozwolić potencjalnie, na ich implementację w istniejącą architekturę systemów w pojazdach – oszczędność masy
Stopień złożoności	<ul style="list-style-type: none"> •brak dodatkowych mechanizmów

Ciekawym rozwiązaniem na spożytkowanie energii cieplnej spalin jest jej zastosowanie do szybszego rozgrzania silnika, co pozwala np. na ograniczenie emisji szkodliwych związków.

2. Energia hamowania

Problem niepożądanego transferu energii poza układ w procesie hamowania został zauważony na początku rozwoju motoryzacji. Jest to swego rodzaju skutek uboczny działania mechanizmu. Do dzisiaj powstało wiele koncepcji pozwalających energię kinetyczną pojazdu zamienić na inną użyteczną jej formę. Konieczność wytracania energii kinetycznej w układzie jezdnym pozostaje aktualna niezależnie od technologii napędu przynajmniej w domenie pojazdów drogowych (ogólniej – w transporcie kołowym). Straty energii hamowania wynoszą od 6-8%. Zgromadzoną energię można wykorzystać do ponownego jego rozpędzenia lub wykorzystać jako dodatkową moc np. w manewrach wyprzedzania.

Tab. 4. Potencjał układów KERS

Potencjał	<ul style="list-style-type: none"> •technologia uniwersalna (proces niezależny od technologii napędowej) •znaczące straty w miejskim cyklu drogowym
-----------	---

a) Koło zamachowe

Koło zamachowe jest powszechnie stosowanym od wieków magazynem energii. Rozwój technologii pozwolił na przejście z masy na prędkość obrotową jako główny nośnik energii.

Tab. 5. Cechy układów z kołem zamachowym

Sprawność	<ul style="list-style-type: none"> •brak przemian energetycznych(+) •niska sprawność przekładni CVT(-) •limit czasowy (straty energii w czasie)
Dojrzałość technologii	<ul style="list-style-type: none"> •wysoko rozwinięta, stosowana w F1 •planowane wdrożenia w samochodach osobowych
Stopień złożoności	<ul style="list-style-type: none"> •duży stopień skomplikowania (koło zamachowe kompozytowe, łożyska beztarciove, praca w komorze próżniowej)



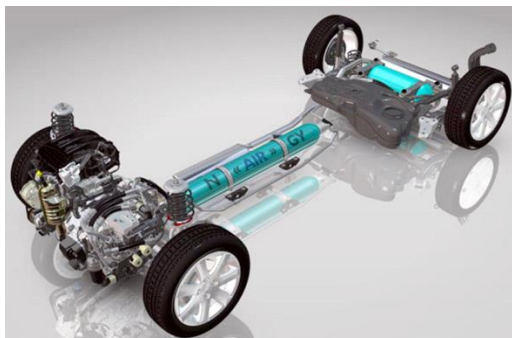
Rys. 3. Przekrój przez układ KERS z kołem zamachowym

b) Układ hydrauliczny

Układy hydrauliczne są popularne w pojazdach ciężkich. Pompa/silnik, włączona do układu napędowego, współpracuje z czynnikiem roboczym (olejem). Olej gromadzony jest pod wysokim ciśnieniem w akumulatorze hydraulicznym. Energia kumuluje się w sprężonym gazie.

Tab. 6. Cechy układów hydraulicznych

Sprawność	<ul style="list-style-type: none"> •wysoka sprawność urządzeń roboczych (do ok. 90%) •podatność na czynniki zewnętrzne (temperatura – przy długim okresie przetrzymywania energii)
Dojrzałość technologii	<ul style="list-style-type: none"> •stosowana z powodzeniem w autobusach i innych pojazdach ciężkich, zwłaszcza poruszających się w cyklach z dużą ilością zatrzymań
Dodatkowy potencjał	<ul style="list-style-type: none"> •układ bardzo trwały
Stopień złożoności	<ul style="list-style-type: none"> •skomplikowane urządzenie robocze, konieczność regularnego serwisowania (czynnika)



Rys. 4. Propozycja przedstawiona przez PSA

c) Układ elastyczny

Pomysł wykorzystania elementów sprężystych do gromadzenia energii hamowania sięga początków motoryzacji jednak większość znanych materiałów jest zbyt ciężkich lub posiada zbyt niską sprężystość, aby wkomponować je w układ odzysku energii. Pojawiają się opracowania, w których jednak deklaruje się możliwość uzyskania pozytywnego bilansu energetycznego. Pojawiają się koncepcje wykorzystania rurek nanowęglowych jako elementów roboczych.

Tab. 7. Cechy układów elastycznych

Sprawność	<ul style="list-style-type: none"> •potencjalnie bardzo wysoka, brak przemian energetycznych
Dojrzałość technologii	<ul style="list-style-type: none"> •układy koncepcyjne
Gęstość energetyczna	<ul style="list-style-type: none"> •obecnie niska, jednak możliwy jest pozytywny bilans energetyczny
Stopień złożoności i dodatkowy potencjał	<ul style="list-style-type: none"> •możliwość wykorzystania właściwości silników sprężynowych opartych na rurkach nano-węglowych w przyszłości •konieczność wprowadzenia układu napinającego

d) Układ elektryczny

Technologia elektryczna opiera się na pracy silnika/generatora elektrycznego, a energia elektryczna gromadzona jest w bateriach lub super kondensatorach.

Tab. 8. Cechy układów elektrycznych

Sprawność	<ul style="list-style-type: none"> •obecność przemian energetycznych (-)
Dojrzałość technologii	<ul style="list-style-type: none"> •technologia obecna w pojazdach elektrycznych i hybrydowych •wysoko zaawansowane systemy w F1
Dodatkowy potencjał	<ul style="list-style-type: none"> •możliwość wykorzystania elementów obecnych w układach napędowych samochodów elektrycznych i hybrydowych (silnik, bateria)
Gęstość energetyczna	<ul style="list-style-type: none"> •wysoka (bateria), niska (superkondensator)
Gęstość mocy	<ul style="list-style-type: none"> •wysoka (superkondensator), niska (bateria)

W celu uzyskania optymalnej kombinacji gęstości energetycznej oraz mocy stosuje się układy łączone wyposażone zarówno w super kondensatory jak i baterie. Innym rozwiązaniem poprawiającym te cechy są układy hybrydowe – energia przekazywana jest zamiast do baterii na koło zamachowe.

W przypadku silników spalinowych, ciekawym rozwiązaniem jest wykorzystanie alternatora, który w procesie hamowania dodatkowo obciąża silnik ładując jednocześnie baterię. Bateria może następnie zasilać układ elektryczny pojazdu odciążając alternator, a tym samym silnik.

e) Układ pneumatyczny

Pomysł wykorzystania pracy potencjalnej sprężonego gazu bezpośrednio do opóźniania oraz rozpędzania pojazdu często pojawia się w opracowaniach koncepcyjnych. Potencjalnie większa gęstość energetyczna oraz mocy względem podobnych układów hydraulicznych. Niestety trudno znaleźć realizację systemu w takiej technologii.

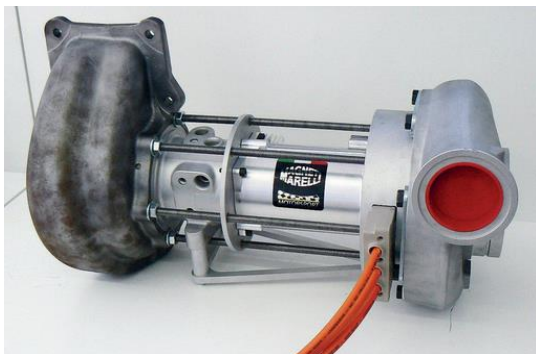
Tab. 9. Cechy układów pneumatycznych

Sprawność	<ul style="list-style-type: none"> nieznana, zależna od urządzenia roboczego (pompa, silnik) podatność na czynniki zewnętrzne (temperatura)
Dojrzałość technologii	<ul style="list-style-type: none"> jedynie koncepcje
Dodatkowy potencjał	<ul style="list-style-type: none"> dostępność czynnika roboczego w przypadku układu otwartego (konieczność przygotowania powietrza – straty) możliwość wykorzystania powietrza bezpośrednio do napędu lub do zwiększenia ciśnienia mieszanki paliwowej
Stopień złożoności	<ul style="list-style-type: none"> brak gotowych rozwiązań urządzeń roboczych mogących pracować sprawnie zarówno w trybie pompy jak i silnika pneumatycznego

Jedną z możliwości jest wykorzystanie silnika spalinowego w trakcie hamowania jako pompy pneumatycznej. Tak zgromadzone powietrze może posłużyć to zwiększenia ciśnienia mieszanki paliwowej.

3. Energia kinetyczna spalin

Najpowszechniej stosowanym układem odzysku energii jest turbosprężarka, wykorzystująca energię kinetyczną spalin do zwiększenia ciśnienia mieszanki paliwowej. Rozwiązanie to jest dopracowywane i stosowane w pojazdach od dziesięcioleci. Aby zwiększyć sprawność działania układu odzysku energii kinetycznej spalin firma Magneti Marelli zaproponowała, aby na wał sprężarki dodatkowo zamontować generator elektryczny.



Rys. 5. Propozycja turbosprężarki sprzężonej z generatorem elektrycznym

4. Zawieszenie rekuperacyjne

Ciekawym przykładem systemów przejmowania energii jest zawieszenie rekuperacyjne. Nie jest to typowy układ odzysku energii gdyż ta nie pochodzi ze strat własnych systemu, a od energii kinetycznej ruchu w osi pionowej pojazdu, wzbudzanego przez ukształtowanie terenu.

Tab. 10. Potencjał zawieszenia rekuperacyjnego

Potencjał	<ul style="list-style-type: none"> ilość energii silnie zależna od jakości podłoża małe ilości energii wykorzystanie/zastąpienie urządzeń obecnych w układach zawieszania
-----------	--

- Układ elektromagnetyczny
Zastosowanie generatora elektrycznego liniowego do produkcji energii elektrycznej (lub obrotowego przy odpowiedniej konstrukcji układu zawieszania),
- Układ przepływowy
W tej koncepcji olej podczas ruchu zawieszania przepływa przez turbinę połączoną z generatorem.
Energia uzyskana w ten sposób może posłużyć do zasilania urządzeń pokładowych.

PODSUMOWANIE

Szeroki zakres prac nad urządzeniami służącymi do odzysku energii prowadzi do powstania znacznie sprawniejszych pojazdów drogowych. Szybki rozwój takich rozwiązań to zasługa zarówno dzisiejszych trendów jak i rywalizacji w sportach motorowych. Trudno bezpośrednio porównać technologie odzyskowe w oderwaniu od konkretnego zastosowania w danym pojeździe oraz konkretnym cyklu drogowym. Duża część z nich wzajemnie się uzupełnia. Najbardziej uniwersalnym rozwiązaniem wydaje się przejmowanie ciepła, jednak jest to proces obciążony dużymi stratami. Jednym z najpopularniejszych kierunków rozwoju technologii odzysku energii są układy KERS służące do rekuperacji energii hamowania.

BIBLIOGRAFIA

- Tawadros P., Zhang A., Boretti A., *Integration and performance of regenerative braking and energy recovery technologies in vehicles* RMIT University, Australia
- Gabriel-Buenaventura A., Azzopardi B., *Energy recovery systems for retrofitting in internal combustion engine vehicles: A review of techniques*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 2015, nr 41.
- Clegg S., *A review of regenerative braking systems*, University of Leeds, 1996
- http://www.exoes.com/DE/gestaltung.html#_WNrlg_Jasgu
- <http://www.formula1-dictionary.net/kers.html>
- <http://www.hybridcars.com/psa-shelves-hybrid-air-project-while-awaiting-new-partners/>
- <http://www.superstreetonline.com/how-to/engine/1403-turbcharger-thermal-energy-recovery-systems/>

Comparative study of energy recovery systems for road vehicles

Paper presents possibilities of energy recuperation in road vehicles with a comparative study of them. Most important ERS characteristics are discussed and analyzed for each technology.

Autorzy:

mgr inż. **Jarosław Zakrzewski**

dr inż. **Robert Pietruszewski** – Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny, Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn