

## CECHY IDEALNEGO UKŁADU ODZYSKU ENERGII

*W artykule omówiono podstawowe wymogi jakie powinien spełniać układ odzysku energii zainstalowany w pojeździe drogowym wraz z zestawieniem cech idealnego systemu oraz ich uzasadnieniem.*

### WSTĘP

Podstawowym zadaniem inżynierii było od zawsze ułatwianie życia, również poprzez kreowanie jego nowych wymiarów. Dzisiaj jednak, poza funkcjonalnością, dużą wagę przywiązuje się do jakości i wpływu na otoczenie danych rozwiązań, już od samego początku procesu projektowego. Ze względu na ogromny wpływ rozwoju technologii na środowisko, wiele działań inżynierów prowadzi do ograniczenia lub eliminacji negawtywnych oddziaływań tego zjawiska. Można w nich zawrzeć również prace nad nowymi sposobami pozyskiwania energii lub lepszego jej wykorzystania. Marnotrawstwo energii jest dużym problemem zarówno w wymiarze ekologicznym jak i ekonomicznym. Liczba zarejestrowanych pojazdów na świecie sięgnęła już 1,2 miliarda, do 2035 roku, zgodnie z szacunkami, może ona wynieść nawet 2 miliardy. Do 2065-70 roku wciąż większość pojazdów stanowić będą jednostki wyposażone w silniki wewnętrznego spalania. Sprawność samych jednostek napędowych tego typu nie przekracza 40%, ilość energii chemicznej paliwa wykorzystywanej na ruch pojazdu to już jedynie do ok. 20%. Przyjmując średnie spalanie pojazdów na bardzo konserwatywnym poziomie 6 litrów. Okazuje się, że na pokonanie 1 km cała światowa flota marnuje 57,6 mln litrów paliwa. Oczywiście, konwencjonalne technologie napędowe mają swoje ograniczenia wynikające z zasady działania. Jednak już 5% oszczędność zużywanego paliwa, wśród jedynie dziesiątej części floty to zysk 360000 litrów na tym dystansie. Można by w ten sposób ograniczyć roczną konsumpcję benzyny o 15 miliardów litrów. Oczywiście liczby te mają bezpośrednie przełożenie na ograniczenie zanieczyszczenia powietrza i oszczędność pieniędzy po stronie użytkowników. Duża konkurencja na rynku motoryzacyjnym oraz regulacje prawne motywują do poszukiwania możliwości poprawy sprawności pojazdów drogowych. Wśród proponowanych rozwiązań można wyróżnić wiele technologii pozwalających odzyskać część energii transferowanej poza układ w trakcie ruchu. Ze względu na wielość koncepcji tego typu systemów, warto zwrócić uwagę jakie wymagania stoją przed urządzeniem służącym do odzysku energii w poruszającym się pojeździe.

### 1. BILANS ENERGETYCZNY I ZAPOTRZEBOWANIE NA ENERGIĘ

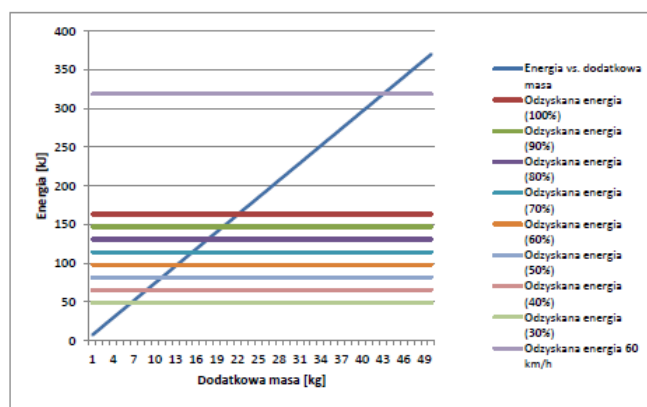
W inżynierii, bilans energetyczny określa stosunek energii zużytej na działanie systemu oraz powstałego efektu. Ilość energii dostarczonej do układu można utożsamiać z jego zapotrzebowaniem energetycznym. W przypadku pojazdu drogowego wpływ na zapotrzebowanie ma m.in. sprawność układu napędowego, cykl drogowy czy masa będąca w ruchu.

Każdy system wprowadzony do pojazdu ma swoją określoną masę. Wiadomo zatem, iż dodanie pewnej ilości kilogramów do

pojazdu poruszającego się w danym cyklu drogowym zwiększy jego zapotrzebowanie na energię dla pokonania danego odcinka. Oczywiście, zadaniem systemów odzysku energii jest dodanie (rekuperacja) pewnej ilości energii do układu. W celu zachowania pozytywnego bilansu energetycznego wartość ta musi być wyższa, najlepiej znacznie, względem zwiększenia zapotrzebowania spowodowanego jego instalacją. Jest to podstawowa cecha wyznaczająca użyteczność danej instalacji.

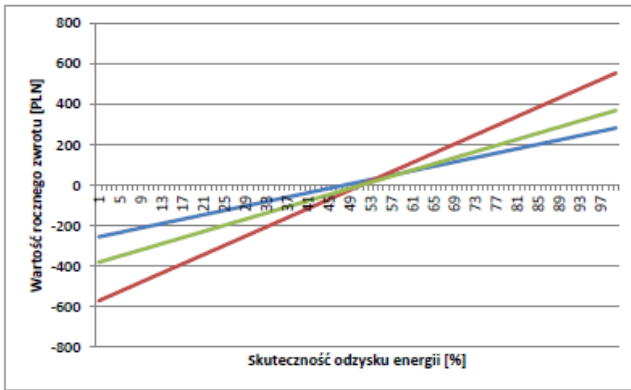
W osiągnięciu tego celu pomaga wykorzystanie jak największej ilości urządzeń obecnych w konstrukcji danego wehikulu niezależnie. Dobrym przykładem takich propozycji są elektryczne układy kers w pojazdach hybrydowych i elektrycznych, czy próby wykorzystania alternatora lub silnika w procesach hamowania rekuperacyjnego. Jednak w przypadku ogólnym, parametrem, który wyznacza możliwości gromadzenia energii w odniesieniu do masy jednostkowej jest gęstość energetyczna wyrażana w J/kg. Jednak istotnym jest, aby cecha ta związana była również z wysoką sprawnością własną systemu. Jednym z głównych czynników prowadzących do zmniejszenia sprawności są przemiany energetyczne wewnątrz układu.

Poniższy wykres przedstawia zestawienie zwiększenia zapotrzebowania energetycznego (linia ukośna) względem sprawności (możliwości odzysku energii – linie poziome), będące częścią analizy wstępnej dla koncepcji układu odzysku energii hamowania w motocyklu.



**Rys. 1.** Analiza wstępna bilansu energetycznego (energia wyrażona procentowo dotyczy całkowitej energii kinetycznej wytracanej w trakcie hamowań w przyjętym miejskim cyklu drogowym)

Jednocześnie, w ramach tej samej analizy przeprowadzono studium potencjalnego, rocznego zwrotu kosztu paliwa, w zależności od ceny za litr oraz dystansu pokonywanego w ciągu okresu rozliczeniowego (roku/sezonu) w funkcji sprawności urządzenia.



**Rys.2.** Analiza potencjalnych oszczędności na paliwie w funkcji sprawności urządzenia ERS (linia niebieska 5 PLN/km – 14620 km; linia czerwona 6 PLN/km – 25500 km; linia zielona 4 PLN/km – 25500 km)

W tym przypadku absolutna granica opłacalności (pomijając amortyzację kosztu inwestycji) oscyluje wokół 50-cio procentowej sprawności.

Kolejnym sposobem na ograniczenie wprowadzanej dodatkowej masy jest skonsolidowanie w jednym urządzeniu odzysku energii z wielu źródeł. Wiedząc, że większość energii trafia na zewnątrz układu przez transfer ciepła, można stwierdzić, iż ciepłe ERS mają w tym aspekcie największy potencjał.

## 2. UKŁADY AKCESORYJNE

Rozwój technologii sprawia, iż nowe modele pojazdów biją kolejne rekordy niskiego spalania. Jednak proces wymiany floty, szczególnie w krajach rozwijających się, jest procesem długotrwałym, zajmujący całe dziesięciolecie. Z drugiej strony poprawę ogólnej sprawności światowych zasobów oraz ich proekologiczności można przyspieszyć przez wprowadzenie odpowiednich układów akcesoryjnych.

Takie urządzenia powinny przede wszystkim w jak najmniejszym stopniu wpływać na oryginalną konstrukcję pojazdu – minimalizacja koniecznych zmian w podstawowej konstrukcji, w celu ich instalacji. Niemniej taka cecha jest również pożądana przy rozwiązaniach montowanych fabrycznie, jednak w tym przypadku nie jest ona kluczowa.

Kolejnym elementem jest konieczność uniknięcia ograniczeń funkcjonalności pojazdu wynikających z instalacji urządzenia.

## 3. BILANS EKONOMICZNY

Pozytywny bilans energetyczny gwarantuje zmniejszenie produkcji szkodliwych substancji oraz oszczędność energii – pozytywny efekt dla środowiska. Z rynkowego punktu widzenia jest to jednak niewystarczające. Aby zapewnić pozytywny efekt ekonomiczny dane urządzenie musi być w stanie, oczywiście, wygenerować większe oszczędności względem kosztów jego instalacji oraz utrzymania. Sytuacja rynkowa w zależności od szerokości geograficznej różni się. Silny kontekst wyznacza tu przede wszystkim cena paliw na danym obszarze, a także dystanse pokonywane w ciągu dnia i roku. Urządzenie amortyzuje się w czasie swojego działania tzn. iż bardzo istotną rolę pełni również jego trwałość.

## 4. WARUNKI DROGOWE

Środowisko pracy elementów składowych pojazdu jest środowiskiem trudnym. Większość pojazdów projektuje się z myślą o

użytkowaniu w całej rozpiętości szerokości i długości geograficznych. Wiąże się to z szerokim zakresem temperatur pracy oraz pozostałych warunków atmosferycznych w tym: intensywnych opady, suchego powietrza czy klimatu morskiego (środowiska korozyjne). Dodatkowo instalacje w pojazdach pracują w częściowej lub całkowitej ekspozycji również na kurz i inne czynniki znajdujące się w powietrzu.

## 5. WTÓRNE WYKORZYSTANIE ENERGII

Energię można gromadzić pod różnymi postaciami: ciepła (materiały o wysokiej pojemności cieplnej), energii elektrycznej (baterie, kondensatory), energii mechanicznej (koło zamachowe, elementy sprężyste), pracy potencjalnej gazu (akumulatory hydrauliczne). Jednak odzysk energii w pojeździe ma sens jedynie wtedy gdy zgromadzona energia może być ponownie wykorzystana. Większość nowoczesnych układów wspomaganie jazdy korzysta z energii elektrycznej jest to więc najłatwiejsza do spożytkowania forma energii w pojeździe. Jednak niektóre formy odzysku (energia hamowania w cyklu miejskim) mogą dostarczać większą jej ilość aniżeli wynosi zapotrzebowanie instalacji elektryczne. Energię można również oddawać w formie mechanicznej zasilając układ napędowy. Dodatkowy moment napędowy może być wykorzystany przy manewrach wyprzedzania bądź podczas ruszania.

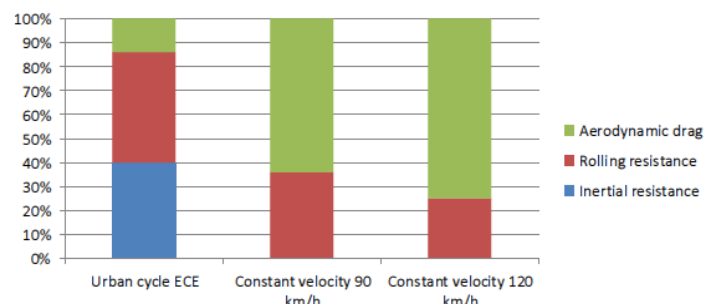
## 6. WYŚCIGI

Niezależnie od wymiaru ekonomicznego oraz bilansu energetycznego, układ odzysku energii może w odpowiednim momencie dostarczyć do pojazdu dodatkowy moment obrotowy. Dwoma kluczowymi aspektami stają się wtedy gęstość energetyczna oraz gęstość mocy. Gęstość mocy jest również istotną cechą dla układów odzysku energii hamowania, gdzie duże ilości energii przekazywane są do urządzenia magazynującego, w krótkim czasie.

## 7. CECHY UKŁADU ODZYSKU ENERGII NA PRZYKŁADZIE KONCEPCJI SYSTEMU ERS W MOTOCYKLU

W pierwszych sekcjach niniejszego artykułu przedstawiono elementy analizy wstępnej dla układu odzysku energii w motocyklu poruszającym się w miejskim cyklu drogowym. Studium oraz projekt koncepcyjny wykonano w Zakładzie Pojazdów Politechniki Łódzkiej w ramach pracy dyplomowej. Jej efektem było przedstawienie koncepcji układu odzysku energii hamowania dla motocykla miejskiego Kawasaki ZR-7.

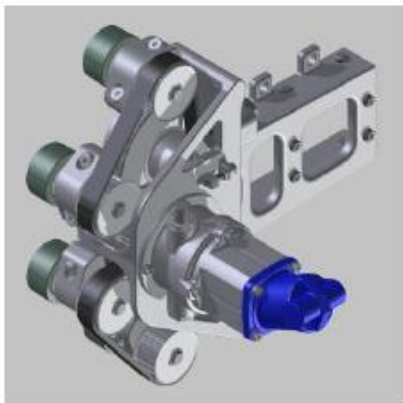
Motocykl uznano za dobrą alternatywę względem samochodu do poruszania się, szczególnie w dużych, aglomeracjach miejskich. Udział hamowań w takim cyklu, a także oporów bezwładności, jest duży. Poniższy wykres przedstawia stosunek poszczególnych rodzajów oporów ruchu w zależności od cyklu drogowego.



**Rys. 3.** Składowe opory ruchu w różnych cyklach drogowych

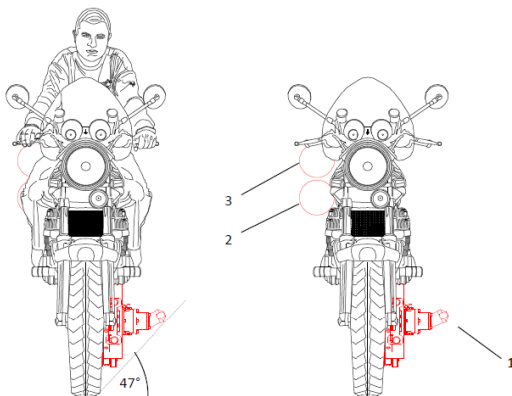
Dodatkowo, oczywiście, straty energii hamowania pozostają aktualne dla różnych technologii napędu przy założeniu utrzymania tradycyjnej architektury pojazdu.

W założeniach wstępnych przyjęto, iż układ ma być systemem akcesoryjnym, możliwym do instalacji w jak największej ilości istniejących modeli. Ze względu na koncepcyjny charakter opracowania, nie przeprowadzono dokładnej statystycznej analizy światowej floty motocykli, a jedynie studium możliwości na podstawie wybranego, reprezentatywnego modelu motocykla. Projekt przewiduje możliwość mocowania układu zaciskowo do wahacza motocykla oraz włączenie do układu napędowego poprzez rolki poruszające się po obręczy tylnego koła. Oczywiście takie rozwiązanie posiada zarówno swoje wady jak i zalety. Osiągnięto jednak podstawowy wymóg – minimalizując zmian w konstrukcji pojazdu.



Rys. 4 Model koncepcyjnego układu odzysku energii (układ roboczy)

Ze względu na trwałość, wysoką sprawność oraz wysokie parametry gęstości energetycznej i gęstości mocy, zdecydowano się na implementację hydraulicznej technologii odzysku energii. Zbiornik, oraz akumulator hydrauliczny mocowane są na stelażu w tylnej części motocykla, analogicznie do kufrów turystycznych. Obliczenia oraz symulacja działania pokazały, iż przy takiej konstrukcji możliwe jest uzyskanie ok. 70% sprawności pełnego cyklu działania (uwzględniającego odzysk i ponowne wykorzystanie energii). Szacunkowo wstępny projekt może nie pozwolić na uzyskanie pozytywnego bilansu energetycznego dla wzorcowego miejskiego cyklu drogowego dla motocykla (uwzględniając średnie spalanie oparte na raportach zużycia paliwa). Jednak przy jeździe dynamicznej (hamowania od 60 km/h) już pierwszy koncept może poprawić ogólną efektywność wykorzystania paliwa o 5 punktów procentowych.



Rys.5. Zabudowa koncepcyjnego układu ERS w konstrukcji motocykla (1 – układ roboczy, 2 – zbiornik, 3 – akumulator hydrauliczny)

Kąt 47° w satysfakcjonującym stopniu umożliwia przechylt pojazdu w miejskich warunkach ruchu. Pod względem wymiarów układ nie zmienia szerokości motocykla (nieznacznie wykracza poza wymiary wyznaczone szerokością kierownicy). Na tym etapie nie określono kosztu budowy oraz utrzymania urządzenia.

## PODSUMOWANIE

Istnieje wiele możliwych źródeł i technologii odzysku energii. Oczywiście każda ma swoje zalety i obciążona jest pewnymi wadami. Idealny układ odzysku energii to taki, który pozwala na przejmowanie energii z wielu, a najlepiej wszystkich możliwych źródeł, zachowując przy tym wysoką sprawność. Powinien charakteryzować się wysoką gęstością mocy i energii. Powinien być trwały i łatwy w utrzymaniu. Powinien wymagać jak najmniej zmian w podstawowej budowie pojazdu, wykorzystywać przy tym możliwie wiele elementów obecnych niezależnie w konstrukcji. Musi być również dostosowany do pracy w trudnych, zmiennych warunkach atmosferycznych i drogowych. Jednak fundamentalne wymagania dotyczą możliwości ponownego wykorzystania energii oraz opłacalność wykorzystania: ekonomiczna, funkcjonalna lub ekologiczna (w zależności od danego zastosowania i kontekstu).

Oczywiście trudno o stworzenie jednego uniwersalnego, idealnego układu odzysku energii. Zwłaszcza, iż potencjalne źródła różnią się zarówno lokalizacją, potencjałem i formą dostępnej energii. Niemniej zakres badań oraz prowadzony projektów i planów wdrożeniowych pozwala sądzić, iż w niedalekiej przyszłości układy odzysku energii będą powszechne wśród światowej floty pojazdów drogowych, a przynajmniej równie popularne jak turbosprężarki, które dzisiaj są chyba najczęściej występującym urządzeniem tego typu instalowanym w pojazdach.

## BIBLIOGRAFIA

1. Zakrzewski J., *Projekt systemu odzyskiwania energii w motocyklu, praca magisterska, Politechnika Łódzka, 2016*
2. Clegg S., *A review of regenerative braking systems, University of Leeds, 1996*
3. 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.*

### Ideal energy recovery system characteristic

*Paper covers a discussion on requirements for energy recovery system installed on a road vehicle, followed with a set of ideal characteristic with its justification.*

Autorzy:

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