

Leszek KASPRZYK*

ANALIZA ZUŻYCIA ENERGII PODCZAS JAZDY POJAZDEM SAMOCHODOWYM

W pracy przedstawiono zagadnienie energochłonności pojazdów samochodowych – przeanalizowano energię potrzebną do jazdy oraz możliwą do odzysku. Omówiono problematykę malejących zasobów paliwowych w kontekście rozwoju motoryzacji. Przedstawiono charakterystykę aktualnie wykorzystywanych pojazdów samochodowych, z uwzględnieniem podziału ze względu na czynnik zasilający. Zaprezentowano zależności opisujące opory działające na samochód w trakcie jazdy oraz metody wyznaczania mocy niezbędnej do przyspieszania i hamowania. Przygotowano aplikację komputerową stworzoną w środowisku MS Visual Studio C# służącą do analizy i prezentacji graficznej przebiegu jazdy. Na podstawie przeprowadzonych badań testowych i wykonanych obliczeń, dokonano analizy energochłonności przykładowego pojazdu pokonującego dwie trasy o różnej charakterystyce. Przeprowadzono również analizę możliwych oszczędności energii podczas jazdy samochodem oraz omówiono problematykę związaną z ograniczeniami zasobników energii.

1. WPROWADZENIE

Rosnąca w ostatnich latach mobilność ludzi oraz związany z nią rozwój technologiczny branży motoryzacyjnej przyczynia się do znaczącego zwiększenia liczby samochodów, a wraz z nim do wzrostu zapotrzebowania na paliwo silnikowe. Sprawia to, że coraz większą uwagę skupia się na ekologii i ekonomii produkowanych pojazdów, szczególnie pod kątem ich eksploatacji. Rozważania nad tą problematyką nakierowane są na różne aspekty i realizowane są zarówno w zakresie poprawy sprawności projektowanych układów napędowych, jak i poszukiwania nowych rodzajów energii, a także metod ich magazynowania. Z tego względu w pracy zajęto się analizą energochłonności samochodów osobowych, skupiając się na energii, którą można odzyskać. Przeprowadzono wstępne badania eksperymentalne polegające na porównaniu zapotrzebowania na energię pojazdu bez możliwości odzysku energii, do zapotrzebowania pojazdu z możliwością odzysku energii. Celem tych badań była analiza oporów ruchu, mocy potrzebnej do przyspieszania i wytracania prędkości, analiza możliwych do uzyskania oszczędności podczas hamowania odzyskowego, a także wskazanie ograniczeń związanych z zastosowaniem różnych rozwiązań zasobników energii.

* Politechnika Poznańska.

2. STAN ZASOBÓW MOTORYZACJI I ZASOBÓW PALIWOWYCH

Według danych z Raportu Branży Motoryzacyjnej Polskiego Związku Przemysłu Motoryzacyjnego z 2012 roku liczba pojazdów samochodowych w Polsce w ostatnich kilkunastu latach wzrosła o ponad 70% i wynosi około 25 mln (75% z nich to samochody osobowe), a w porównaniu do roku 1990 wzrost ten wynosi ponad 300% [2, 6]. Co więcej przewiduje się też, że wskaźnik nasycenia samochodami osobowymi – wyrażony liczbą aut przypadających na tysiąc mieszkańców – będzie systematycznie rósł i nasyci się około 2020-2025 roku w liczbie 525÷550 [6]. Z tego powodu naukowcy na całym świecie coraz częściej próbują oszacować czas, na jaki wystarczy zasobów paliwowych. Przewiduje się, że zasoby te wystarczą na około 40 lat, a kierowcy z coraz większym zmartwieniem przyglądają się ich cenom, które systematycznie wzrastają.

Część kierowców próbuje szukać oszczędności wybierając mniejsze samochody. Z tego powodu w ostatnich latach w parku samochodowym zauważalna jest przewaga modeli małych i kompaktowych nad dużymi i luksusowymi. Również w kwestii pojemności silnika samochodów zauważalna jest tendencja na kupowanie aut małolitrażowych z silnikami o pojemności do 1400 cm³ (niezależnie od rodzaju paliwa) [2]. Innym popularnym rozwiązaniem na oszczędności jest zakup samochodów przystosowanych do spalania LPG. Ich udział we flocie systematycznie wzrastał i aktualnie wynosi około 15%, chociaż ze względu na duży koszt instalacji ostatnio maleje popyt na samochody nowe przystosowane do spalania LPG [2]. Podobnie przez pewien okres zauważyć można było wzrost zainteresowania silnikami Diesla, jednak w 2011 roku liczba zarejestrowanych samochodów z takim silnikiem spadła o 6% w stosunku do poprzedniego roku i wyniosła około 40% [2].

Modnym, lecz jeszcze mało liczny rozwiązaniem, jest wzbogacenie pojazdu o inny rodzaj napędu (pojazdy hybrydowe – najczęściej z silnikiem elektrycznym) lub zamiana silnika spalinowego na elektryczny. Według danych z Raportu PZPM liczba pojazdów z napędem hybrydowym wynosi 0,25%, a elektrycznym 0,01%. Świadczy to o tym, że kierowcy wciąż uważają te rozwiązania za mało opłacalne. Szczegółowe dane dotyczące liczby samochodów osobowych zarejestrowanych w Polsce w 2010 oraz 2011 roku przedstawione zostały w tabeli 1.

Tabela 1. Liczba samochodów osobowych zarejestrowanych w Polsce w 2010 i 2011 roku w zależności od rodzaju czynnika zasilania silnika [2]

Rok	Benzyna	Olej napęd.	LPG	CNG	Elektryczny	Hybrydowy
2010	166 657	143 852	4858	19	7	615
2011	163 527	109 740	3257	43	35	825

W celu wykazania, że zastosowanie jednego z powyższych czynników może być uzasadnione ekonomicznie, dokonano analizy energetycznej pojazdu, przy uwzględnieniu specyfiki jego pracy.

3. ANALIZA ENERGETYCZA POJAZDÓW SAMOCHODOWYCH

Chcąc wykazać zasadność stosowania układów napędowych, umożliwiających odzysk energii, konieczne jest przeprowadzenie szczegółowej analizy energii potrzebnej do ruchu pojazdu samochodowego. Dokonując takiej analizy należy uwzględnić siły działające na pojazd w trakcie ruchu. Siły te zależą od wielu czynników, z czego do najistotniejszych należy zaliczyć opory toczenia i opory aerodynamiczne.

Siła toczenia (F_t) wyznaczana jest z zależności [4]:

$$F_t = mgf_t \quad (1)$$

gdzie: m – masa pojazdu, g – przyspieszenie ziemskie, f_t – współczynnik oporu toczenia.

Współczynnik oporu toczenia zależy od wielu czynników, takich jak rodzaj ogumienia, prędkość jazdy, ciśnienie powietrza w ogumieniu itp. Zakładając prawidłową i stałą wartość ciśnienia oraz rodzaj ogumienia, wpływ prędkości jazdy, spowodowany między innymi odkształcaniem się opony, określić można z następującego wzoru [4]:

$$f_t = f_{t0}(1 + Kv^2) \quad (2)$$

gdzie: v – prędkość pojazdu, K – współczynnik dodatkowego oporu toczenia (dla powierzchni asfaltowych przyjmuje się $K = 5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^2/\text{m}^2$), f_{t0} – współczynnik oporu toczenia dla małych prędkości.

Współczynnik oporu toczenia dla małych prędkości najczęściej wyznacza się wykonując próbę wybiegu pojazdu. Wówczas, aby obliczyć jego wartość, należy zastosować wzór:

$$f_{t0} = \frac{v_p^2}{2gS_t} \quad (3)$$

gdzie: v_p – prędkość początkowa pojazdu, g – przyspieszenie ziemskie, S_t – droga toczenia (wybiegu) samochodu.

W praktyce dla pojazdów osobowych jadących po nawierzchni asfaltowej współczynnik oporu toczenia dla małych prędkości wynosi od 0,012 do 0,014.

Kolejnym oporem oddziałującym w znaczący sposób na jadący pojazd jest siła aerodynamiczna, wynikająca z wzdłużnych oporów powietrza (F_p) [4]:

$$F_p = \frac{1}{2} \rho c_x A v_w^2 \quad (4)$$

gdzie: ρ – gęstość powietrza (dla warunków normalnych 0°C i ciśnienia 1013 hPa gęstość suchego powietrza jest równa około 1.293 kg/m^3), c_x – współczynnik oporu

powietrza w kierunku wzdłużnym – zależy od kształtu pojazdu i dla samochodów osobowych wynosi od 25% do 45% (zazwyczaj około 30%) [5], A – pole powierzchni czołowej pojazdu, v_w – prędkość pojazdu względem powietrza.

Na podstawie wyznaczonych oporów ruchu, znając prędkość chwilową pojazdu v (a na tej podstawie również przyspieszenie pojazdu a_p oraz siłę wypadkową F działającą na pojazd), oszacować można siłę napędową F_N (przy założeniu jazdy po płaskim terenie):

$$F_N = F + F_p + F_t \quad (5)$$

Znając wartość siły napędowej oraz przyjmując pewną sprawność mechaniczną układu napędowego η (sprawność układu napędowego wynosi od 85 do 95%), wyliczyć można energię potrzebną do pokonania zadanej drogi S w czasie t :

$$E = \frac{F_N S}{\eta} \quad \text{lub} \quad E = \frac{F_N t v}{\eta} \quad (6)$$

oraz zapotrzebowanie na moc

$$P = \frac{E}{t} \quad (7)$$

4. PRZYKŁADOWE BADANIA I ANALIZY TESTOWE

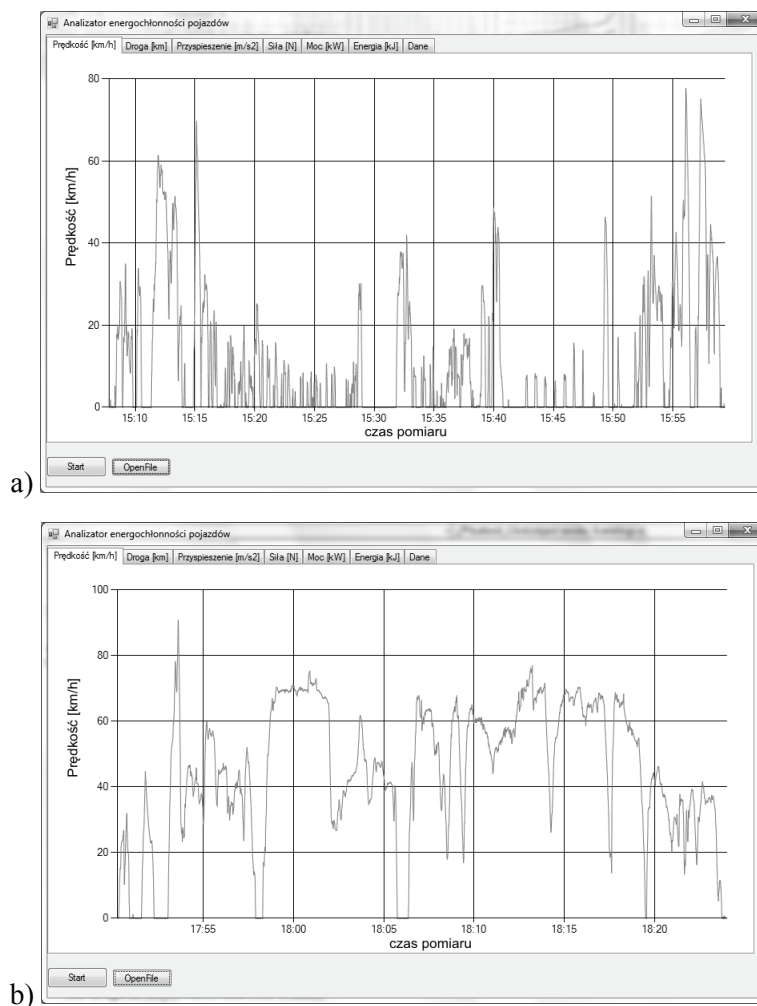
W celu praktycznej weryfikacji przedstawionych rozważań przeprowadzono analizę energochłonności przykładowego pojazdu podczas pokonywania wybranych tras o różnej charakterystyce. Wykorzystując zestaw GPS dokonano rejestracji wartości chwilowej prędkości pojazdu samochodowego marki Opel Vectra z silnikiem Diesla 1.9 CDTI o mocy 110 kW i łącznej masie równej około 1700 kg. Dokonano analizy parametrów jazdy pojazdu samochodowego jadącego dwoma odcinkami drogi – w centrum miasta w czasie godzin szczytu (9,04 km w czasie 52 min) oraz na terenie mieszanym poza godzinami szczytu (25 km w czasie 34 min). Następnie przygotowano aplikację komputerową stworzoną w środowisku MS Visual Studio C# 2010 EE służącą do analizy i prezentacji graficznej przebiegu jazdy. Zarejestrowane podczas jazdy współrzędne geograficzne przedstawiono na rysunku 1, a przebiegi prędkości jazdy w czasie na rysunku 2. Wybór rodzaju trasy przejazdu podyktowany był chęcią wykazania możliwości odzysku energii przez pojazdy elektryczne, które przy aktualnych możliwościach gromadzenia energii elektrycznej są przeznaczone głównie do jazdy na krótkich dystansach (zazwyczaj miejskiej).

Następnie na podstawie zależności opisanych w rozdziale 3 dokonano analizy energochłonności pojazdu oraz jego zapotrzebowania na moc. Podczas obliczeń przyjęto następujące parametry pojazdu: współczynnik oporu toczenia dla małych prędkości $f_{t0} = 0,013$, pole powierzchni czołowej $A = 2,75\text{m}^2$, współczynnik oporu powietrza $c_x = 30\%$. Uzyskane wyniki obliczonego zapotrzebowania na moc przedstawiono na rysunku 3. Moce (i później energie) pobierane przez pojazd dla

zapewnienia jego ruchu przyjęto jako wartości dodatnie, a odzyskiwane podczas hamowania jako wartości ujemne. Na podstawie obliczonej mocy wyznaczono energię, jaką zużył badany pojazd w celu przyspieszania (rys. 4 a i b, krzywa nr 1). Dodatkowo, uwzględniając opory ruchu, obliczono energię jaką można byłoby odzyskać w wyniku hamowania elektrodynamicznego (rys. 4 a i b, krzywa nr 2) oraz ich sumę – czyli energię jaką zużyłby pojazd, gdyby miał możliwość odzysku energii (rys. 4 a i b, krzywa nr 3).



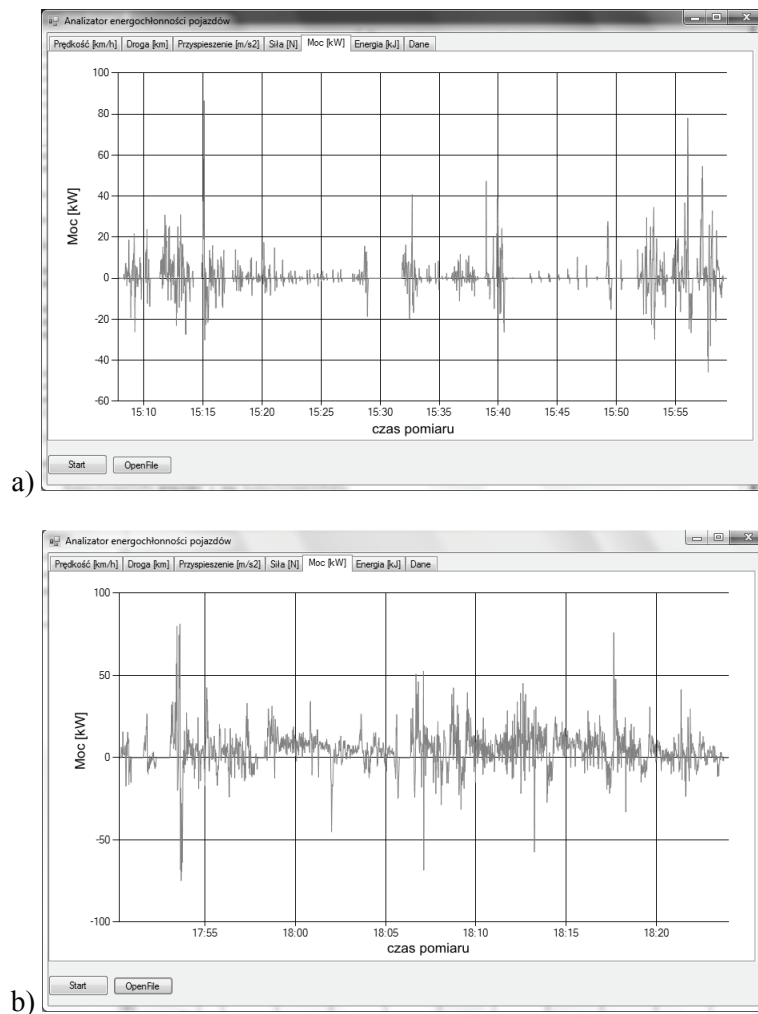
Rys. 1. Przebieg tras, podczas których dokonano analizy zużycia energii
a) odcinek miejski w godzinach szczytu, b) odcinek trasy mieszanej poza godzinami szczytu



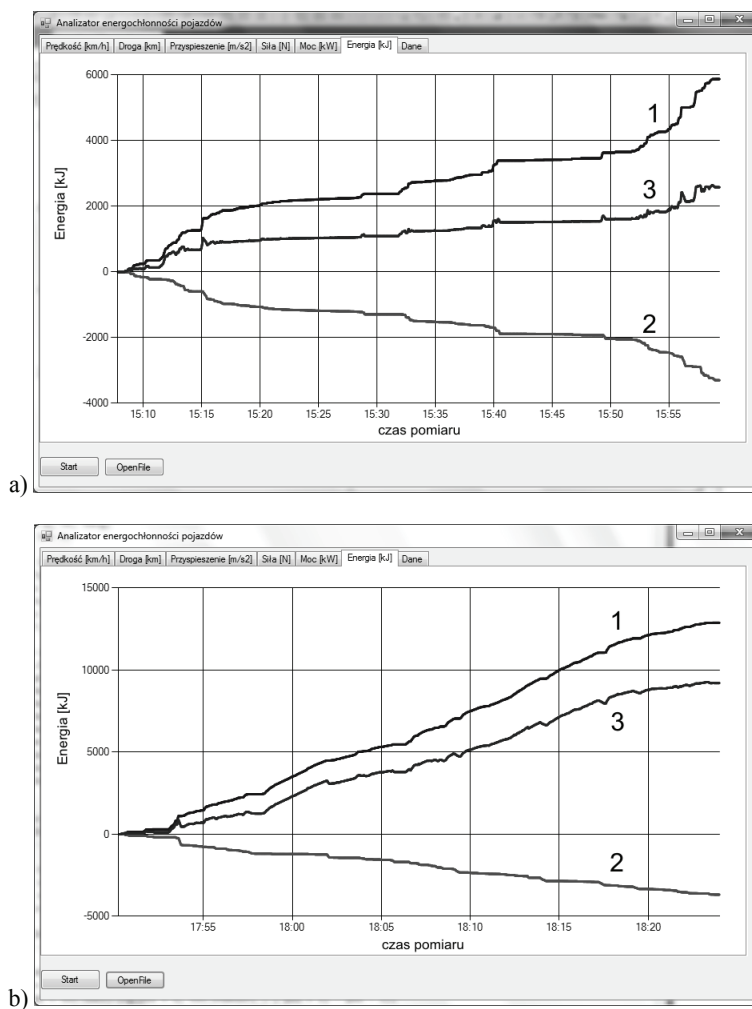
Rys. 2. Zarejestrowana prędkość jazdy w funkcji czasu
 a) odcinek miejski w godzinach szczytu, b) odcinek trasy mieszanej poza godzinami szczytu

W celu weryfikacji poprawności obliczeń energochłonności pojazdu wyznaczono zapotrzebowanie na olej napędowy podczas przejazdu zadanych odcinków drogi, zakładając średnią sprawność silnika spalinowego równą 30% [5] oraz wartość energetyczną paliwa równą 36 MJ/l [3,5]. Uzyskane wyniki porównano z wartościami wskazanymi przez komputer pokładowy (którego poprawność wskazań wcześniej zweryfikowano). W przypadku trasy miejskiej obliczone zapotrzebowanie na paliwo wyniosło 0,82 l, a w przypadku drugiej trasy 1,23 l. Wyniki te nieznacznie różniły się od wskazań komputera pokładowego, który w pierwszym przypadku wskazał wartość 0,8 l, a w drugim 1,2 l. Znikomość

uzyskanych odchyłek uznano za potwierdzenie poprawności obliczonych wartości zużycia energii, uznając że różnice w oszacowanych i wskazanych przez komputer pokładowy wartościach wynikają najprawdopodobniej z przybliżeń sprawności silnika spalinowego i układu napędowego, która nie jest stała i w bardzo dużym stopniu zależy od aktualnego przełożenia i prędkości obrotowej silnika.



Rys. 3. Obliczone zapotrzebowanie na moc w funkcji czasu
a) odcinek miejski w godzinach szczytu, b) odcinek trasy mieszanej poza godzinami szczytu



Rys. 4. Energia zużyta podczas jazdy (1), energia jaką można odzyskać podczas wytracania prędkości (2) oraz ich suma (3) w funkcji czasu: a) odcinek miejski w godzinach szczytu, b) odcinek trasy mieszanej poza godzinami szczytu

Prowadząc dalsze rozważania związane z analizą energii pojazdu, rozważano zasobność źródła energii elektrycznej, które umożliwiłoby pokonanie odcinka drogi o długości do 150 km, przy jednoczesnej analizie zdolności układów elektrycznych do przekazywania odpowiedniej mocy w stanach dynamicznych – zarówno w przypadku oddawania energii (w czasie przyspieszania pojazdu), jak i w przypadku odzyskiwania energii (w momentach hamowania).

Jak wykazano w artykule [1] pokonanie trasy o długości 200 km przez podobny pojazd wymaga zastosowania 2 bloków po 7 akumulatorów trakcyjnych typu Trojan

T1275 150 Ah, przeznaczonych do pracy cyklicznej i do głębokiego rozładowania, o łącznym napięciu 84 V. Jednakże, jak wynika z rysunku 3, w obu analizowanych przypadkach podczas jazdy moc dodatnia (potrzebna do napędzania pojazdu) przekroczyła wartość kilkudziesięciu kW. Stało się tak w momentach gwałtownego przyspieszania (ruszania). W takich przypadkach zastosowane akumulatory byłyby niewystarczające ze względu na fakt, że wymagałoby to poboru prądu o wartościach przekraczających 900 A, co przekraczałoby możliwości zaproponowanych źródeł energii. Podobna sytuacja miałaby miejsce podczas gwałtownego zmniejszania prędkości – wartości mocy ujemnej na rysunku 3. Ładowanie akumulatorów tak dużym prądem doprowadziłoby do ich szybkiego zniszczenia i konieczności ich częstej wymiany. Zważywszy że znaczna część kosztów eksploatacyjnych w przypadku pojazdów elektrycznych wynika z kosztów wymiany akumulatorów [1], byłoby to wysoce nieekonomiczne. Zastosowanie wyłącznie akumulatorów jest niekorzystne nawet wówczas, gdy zwróci się uwagę na fakt, że podczas jazdy – zarówno w ruchu miejskim, jak i w terenie mieszanym – przez znaczną większość czasu zapotrzebowanie na moc nie przekracza wartości 30 kW i możliwe byłoby ograniczenie prądu do np. 300 A. Z tego względu istotne wydaje się zastosowanie dodatkowych zasobników energii – które umożliwiłyby przekazywanie dużych prądów (w obu kierunkach) w stanach dynamicznych – takich jak na przykład superkondensatory. Potwierdza to przedstawione w artykule [1] rozważania teoretyczne na temat doboru magazynów energii elektrycznej w pojazdach.

Należy jednak podkreślić fakt wystąpienia różnicy w zapotrzebowaniu na energię w przypadku pojazdu z możliwością odzysku energii, w porównaniu do pojazdu niemożliwiającego odzysk energii. Jak wynika z zależności przedstawionych na rysunku 4, ilość energii jaką zużył pojazd w ruchu miejskim wynosi około 5 800 kJ, z czego odzyskać można byłoby 3 300 kJ (analizę wykonano pomijając straty przetworników energii). Możliwość odzyskania dużej energii wynika z niewielkiej prędkości jazdy oraz częstego przyspieszania i zwalniania. Gorszy wynik uzyskano podczas analizy ruchu pojazdu w drugim omawianym przypadku – ilość zużytej przez pojazd energii dochodzi do 12 900 kJ, z czego możliwej do odzyskania jest około 3 700 kJ. Tak znacząca różnica spowodowana jest jazdą ze znacznie większą prędkością (średnia prędkość w pierwszym przypadku wynosi około 11 km/h, natomiast w drugim około 45 km/h).

5. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych przykładowych badań testowych potwierdzono, że zastosowanie układów umożliwiających odzysk energii może pozwalać na znaczne oszczędności energii. W analizowanych przypadkach, różnych pod względem charakterystyki jazdy, wykazano, że zastosowanie dostępnych zasobników energii elektrycznej może umożliwić kilkudziesięciu procentową oszczędność energii – ponad 50% w przypadku jazdy w centrum

miasta przy bardzo dużym natężeniu ruchu oraz 25% w przypadku jazdy na odcinku mieszanym (częściowo na ternie zabudowanym) w okresie niskiego natężenia ruchu samochodowego. W pracy zwrócono również uwagę na problematykę związaną z ograniczeniami zasobników energii dotyczącymi dopuszczalnych prądów ładowania i rozładowania – wykazano, że zastosowanie wyłącznie tradycyjnych akumulatorów kwasowych może doprowadzić do przedwczesnego obniżenia ich zdolności do gromadzenia energii i w konsekwencji do znaczącego wzrostu kosztów eksploatacyjnych pojazdów elektrycznych i hybrydowych. Przedstawiono także coraz bardziej popularne rozwiązania wykorzystujące moduły superkondensatorów do przekazywania dużych energii w stanach dynamicznych (gwałtownego przyspieszania i hamowania), których parametry dają nadzieję na sprawne i długotrwałe działanie (odzyskiwanie i oddawanie ładunku) podczas jazdy o różnej charakterystyce.

LITERATURA

- [1] Bednarek K., Kasprzyk L., Zasobniki energii w systemach elektrycznych – część 2. Analizy porównawcze i aplikacje, Poznan University of Technology, Academic Journals, Electrical Engineering, Issue 69, ISSN 1897-0737, 2012, pp.209-218.
- [2] Raport Branży Motoryzacyjnej, Polski Związek Przemysłu Motoryzacyjnego, 2012 r.
- [3] Rozporządzenie Prezesa Rady Ministrów z dnia 10.05.2011 r. Dz. U. z 2011 r. nr 96, poz. 559.
- [4] Słaski G., Badania szacunkowe oporów ruchu pojazdu użytkowego w drogowej próbie wybiegu, Logistyka 3/2011, ISSN 1231-5478, Instytut Logistyki i Magazynowania, 2011, str. 2727-2737.
- [5] Wolnik T., Komel B., Analiza kosztów układu kogeneracyjnego z silnikiem spalinowym Diesla, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 86/2010, str. 175-180.
- [6] <http://www.stat.gov.pl/gus>

ENERGY ANALYSIS OF THE VEHICLE DURING RUNNING

This paper presents the problem of energy consumption in car vehicles - the energy needed to drive and possible recovery was analyzed. Discusses the problems of dwindling fuel resources in the context of the automotive industry. The characteristics of currently used vehicles, including breakdown by the power factor. Depending presented describing the resistance acting on the car during the drive and determination methods of power needed for acceleration and braking. Prepared computer application created in MS Visual Studio C # is used to analyze and present graphical waveform driving. On the basis of testing and calculations made, the analysis of energy consumption of the vehicle sample overcoming two routes with different characteristics. An analysis of the energy savings while driving and discusses issues related to energy storage constraints.