

BADANIA ODZYSKU ENERGII HAMOWANIA POJAZDU O NAPĘDZIE HYBRYDOWYM

ANDRZEJ GAJEK¹, PIOTR STRZĘPEK²

Politechnika Krakowska

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań odzysku energii hamowania osobowego samochodu o napędzie hybrydowym kół przednich. Badaniom poddano pojazd z szeregowo równoległym, spalino-elektrycznym, hybrydowym układem napędowym. Układ ten umożliwia zamianę rodzaju pracy silnika elektrycznego na pracę prądnicową i ładowanie baterii wysokonapięciowej z wykorzystaniem energii hamowania. Wykonano pomiary prądu ładowania baterii podczas hamowania przy różnych opóźnieniach ruchu pojazdu. Przeanalizowano algorytm sterowania prądem ładowania, udział energii odzyskanej w stosunku do całkowitej energii hamowania oraz moc hamowania odzyskowego w stosunku do całkowitego zapotrzebowania mocy hamowania. Przedstawiono chwilowe zapotrzebowanie mocy przy hamowaniu na jezdni poziomej o niewielkim współczynniku oporów toczenia. Przebadano udział mocy elektrycznej w bilansie energetycznym hamowania oraz zapotrzebowanie i odzysk energii podczas procesu hamowania.

Słowa kluczowe: pojazd o napędzie hybrydowym, hamowanie odzyskowe, energia hamowania, moc hamowania

1. Wstęp

W związku z zaostrzaniem przepisów dotyczących toksyczności spalin oraz ograniczaniem emisji dwutlenku węgla do atmosfery, producenci pojazdów poszukują możliwości zmniejszenia zużycia paliwa przez samochody. Jednym ze sposobów zmniejszenia zużycia paliwa, a więc i wydzielania dwutlenku węgla, są napędy hybrydowe elektryczno-spalinowe. Obecnie obserwuje się szybki rozwój samochodów z tego typu napędem, zarówno osobowych jak i autobusów. W porównaniu do pojazdów z silnikami tylko spalinowymi, charakteryzują się znacznie mniejszym zużyciem paliwa ropopochodnego oraz możliwością jazdy tylko z wykorzystaniem silnika elektrycznego, przy zerowej emisji spalin, co jest szczególnie ważne w ruchu miejskim.

¹ Politechnika Krakowska, Instytut Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych, al. Jana Pawła II 37, 31-364 Kraków, e-mail: gajeka@mech.pk.edu.pl

² Politechnika Krakowska Instytut Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych, al. Jana Pawła II 37, 31-364 Kraków, e-mail: piotrs@mech.pk.edu.pl

Jednym ze sposobów ograniczenia zużycia paliwa i wydłużenia przebiegu pojazdu z użyciem napędu elektrycznego jest możliwość odzysku (rekuperacji) energii hamowania [1, 2, 6].

Możliwe są dwie metody odzysku energii hamowania pojazdów hybrydowych:

- napęd prądnicy bezpośrednio od kół pojazdu i ładowanie baterii wysokonapięciowej,
- stosowanie superkondensatorów.

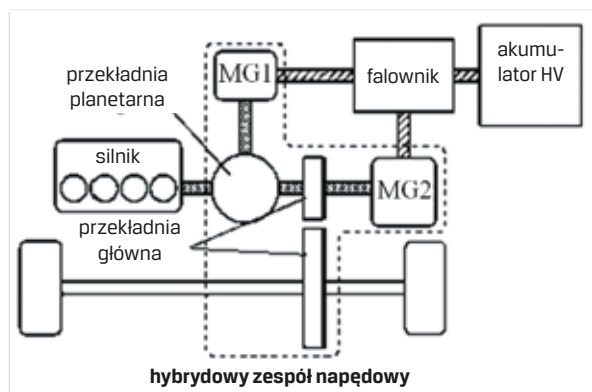
Ładowanie odzyskowe baterii pozwala na zgromadzenie dużej ilości energii w stosunku do możliwości kondensatorów, ale wymaga odpowiedniego czasu hamowania. Natomiast ładowanie kondensatorów pozwala na gromadzenie energii w krótkim czasie. Te dwa „magazyny” energii elektrycznej mogą uzupełniać się wzajemnie.

W celu oszacowania możliwości odzysku energii hamowania w warunkach eksploatacyjnych, przeprowadzono badania drogowe hybrydowego samochodu osobowego z szeregowo równoległym układem napędowym oraz odzyskowym ładowaniem baterii.

2. Obiekt badań

Obiektem badań był samochód osobowy z szeregowo równoległym hybrydowym układem napędowym, z rozdziałem mocy (rys. 1). Dzięki zastosowaniu przekładni obiegowej, łączącej silnik spalinowy, generator i silnik elektryczny oraz systemu sterowania przepływem mocy, uzyskano dowolne sumowanie mocy obu silników: spalinowego i elektrycznego. Układ ten umożliwia napęd kół tylko silnikiem elektrycznym lub spalinowym, albo równocześnie obydwoma silnikami oraz ładowanie baterii wysokonapięciowej w poszczególnych fazach pracy układu. Możliwe jest również hamowanie elektrodynamiczne kół przednich poprzez zmianę pracy silnika elektrycznego MG2 na pracę prądnicową (generatorową). Zasadniczy układ hamulcowy, działający na wszystkie koła pojazdu, to system elektrohydrauliczny z czujnikiem przemieszczenia i symulatorem siły nacisku na pedał hamulca oraz pompą wysokiego ciśnienia i akumulatorem ciśnienia. W fazie hamowania sterownik hamulców otrzymuje sygnał z czujnika przemieszczenia pedału hamulca i z czujnika ciśnienia. Jest to tzw. funkcja feeling.

Sygnał ten jest podstawową informacją o zamierzonym opóźnieniu hamowania, jakiego wymaga kierowca. Na tej podstawie program w sterowniku hamulców oblicza wymagane siły hamujące odpowiadające zadanemu opóźnieniu i uruchamia hamowanie hydrauliczne wszystkich kół oraz hamowanie elektrodynamiczne kół przednich, sterując napięciem i prądem ładowania baterii wysokonapięciowej. Ciśnienie w zaciskach hamulców jest mierzone w sposób ciągły i dostosowywane do wymaganego opóźnienia pojazdu i poślizgu kół, z uwzględnieniem hamowania elektrycznego. W procesie hamowania bierze udział również silnik spalinowy, przy czym hamowanie silnikiem jest minimalizowane przez zastosowanie zmiennych faz rozrządu, obniżających w tym okresie ciśnienie sprężania (tzw. obieg Atkinsona) w celu zwiększenia odzysku energii elektrycznej.

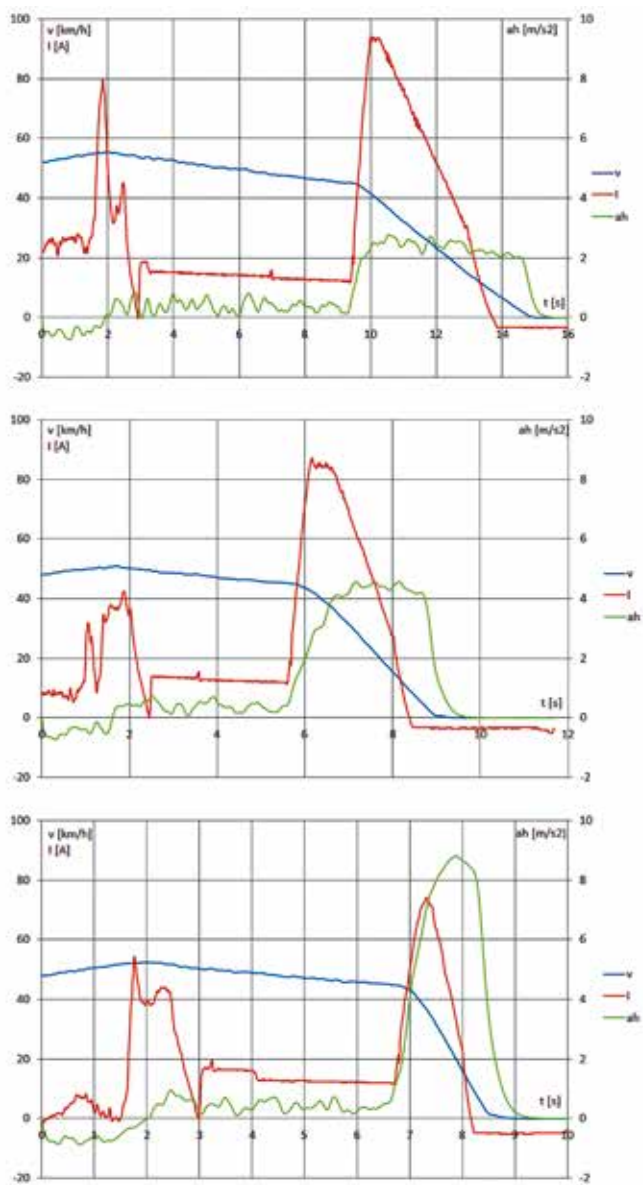


Rys. 1. Schemat układu napędowego badanego samochodu hybrydowego. MG1 – prądnica, MG2 – silnik elektryczny [9]

3. Badanie odzysku energii

Badania odzysku energii przeprowadzono na prostym odcinku drogi, na jezdni betonowej, płaskiej, suchej. Samochód rozpędzono do prędkości 50 km/h, 70 km/h i 90 km/h, a następnie hamowano ze stałym naciskiem na pedał hamulca, aż do zatrzymania pojazdu. Nacisk ten dobierano tak, aby uzyskać hamowanie łagodne (opóźnienie około 2 m/s^2), średnie (około 4 m/s^2) i intensywne (ponad 6 m/s^2). Stopień naładowania baterii wysokonapięciowej NiH (napięcie nominalne 201,6 V, pojemność 6 Ah [9]) przed hamowaniami utrzymywano na stałym poziomie około 30%. Dla każdej prędkości początkowej wykonywano n powtórzeń pomiarów, rejestrując wartości prędkości pojazdu, nacisk na pedał hamulca i wartość prądu ładowania baterii w czasie hamowania. Mierzono również napięcie ładowania baterii. Przykładowe wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 2 i 3.

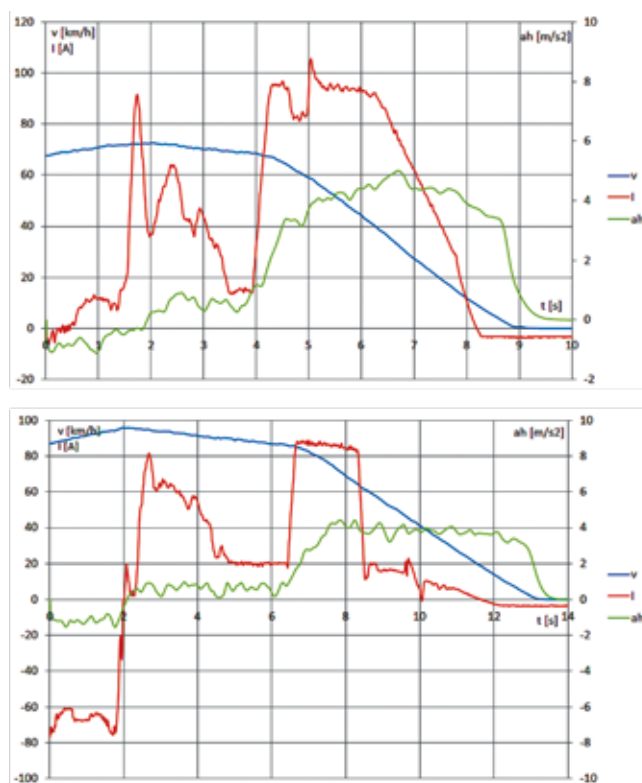
We wszystkich przypadkach hamowania odzyskowego następowało wystawienie prądu ładowania baterii na wartość maksymalną ($90 \div 100$) A (bateria niklowo-wodorkowa). Napięcie ładowania wynikało z ograniczenia dopuszczalnej mocy ładowania tego typu baterii oraz z algorytmu sterowania ładowaniem. Wartość maksymalną prądu utrzymywano była przez krótki okres hamowania, a następnie prąd ładowania był stopniowo ograniczany aż do zaniku przy prędkości około ($10 \div 15$) km/h. W kilku przebiegach hamowania wartość prądu maksymalnego była ograniczana ze względu na wzrost temperatury baterii. Po osiągnięciu prędkości samochodu około 10 km/h hamowanie elektrodynamiczne zanikało. Charakterystyczne jest również pojawienie się „piku” prądowego rzędu ($50 \div 80$) A w chwili przechodzenia z fazy napędu w fazę jazdy z hamowaniem silnikiem spalinowym, po czym wartość prądu ładowania obniżała się do około 15 A, a samochód zwalniał z opóźnieniem średnim około $0,5 \text{ m/s}^2$. Dobór prądu ładowania baterii w tym okresie związany był z realizacją opóźnienia ruchu pojazdu hybrydowego, takiego jakie występuje w normalnych



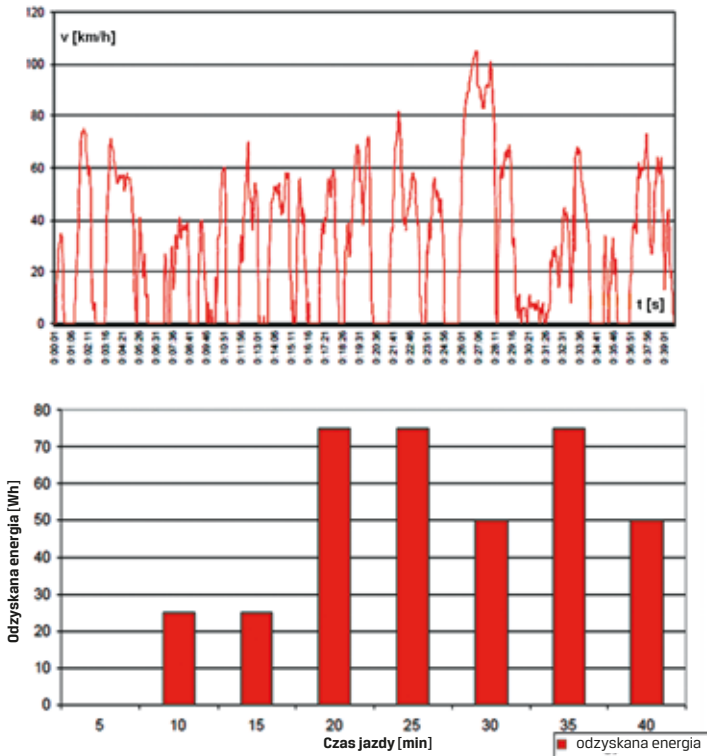
Rys. 2. Prąd ładowania odzyskowego przy różnych opóźnieniach hamowania dla prędkości początkowej równej 50 km/h

warunkach ruchu, dla pojazdów konwencjonalnych, po zwolnieniu pedału przyspieszenia i hamowaniu silnikiem. W tej fazie ruchu samochodu hybrydowego występowało również hamowanie od silnika spalinowego, ale ograniczone było poprzez przestawienie faz rozrządu, powodujące znaczne zmniejszenie ciśnienia sprężania silnika.

Przeprowadzono również badania eksploatacyjne odzysku energii w warunkach ruchu miejskiego. Przykładowo, podczas 40-minutowego cyklu jezdnego w rzeczywistych warunkach ruchu (zmiany prędkości pokazano na rys. 4) układ rekuperacji energii pozwolił na odzysk 375 Wh energii (dokładność $\pm 5\%$).



Rys. 3. Prąd ładowania odzyskowego podczas hamowania z opóźnieniem równym $(4 \div 4,5) \text{ m/s}^2$, prędkość początkowa równa 70 km/h i 90 km/h



Rys. 4. Prędkość samochodu oraz energia odzyskana w cyklu jazdy miejskiej [7]

4. Analiza wyników badań

Analizę możliwości odzysku energii hamowania przeprowadzono dla następującego bilansu energetycznego:

$$E = E_h + E_a + E_t \quad (1)$$

gdzie

$$E = \int_0^t m a_h v(t) dt + \sum_1^4 \int_0^t I_k \varepsilon_k(t) \omega_k(t) dt$$

E_h – energia wytracana przez układ hamulcowy pojazdu i opory ruchu silnika,

E_a – energia wytracana przez siły oporu aerodynamicznego,

$$E_a = \int_0^t c_x A v(t)^2 \frac{\rho}{2} v(t) dt$$

E_t – energia wytracana przez siły oporu toczenia,

$$E_t = \int_0^t mgfv(t) dt$$

m – masa pojazdu,

I_k – moment bezwładności ciał wirujących (kół),

v, ω – prędkość hamowania: liniowa pojazdu i kątowna kół,

a_h, ε_k – opóźnienie pojazdu i koła,

c_x – współczynnik oporu aerodynamicznego pojazdu,

A – pole powierzchni czołowej pojazdu,

ρ – gęstość powietrza,

f – współczynnik oporów toczenia.

Pomijając energię E_t , jako małą, można zapisać:

$$E_h = \int_0^t m a_h v dt + \sum_1^4 \int_0^t I_k \varepsilon_k \omega_k dt - \int_0^t c_x A v^2 \frac{\rho}{2} v dt \quad (2)$$

Wartość energii E_h niezbędnej do zatrzymania pojazdu, jaką wytwarzał układ hamulcowy badanego samochodu, obliczano dla pojazdu o masie 1475 kg, współczynniku oporu aerodynamicznego 0,25 i powierzchni czołowej 2,2 m². Ilość energii zgmagazynowanej w baterii wysokonapięciowej podczas hamowania obliczano z zależności:

$$E_{reg} = \int_{t_1}^{t_2} U(t) I(t) dt \quad (3)$$

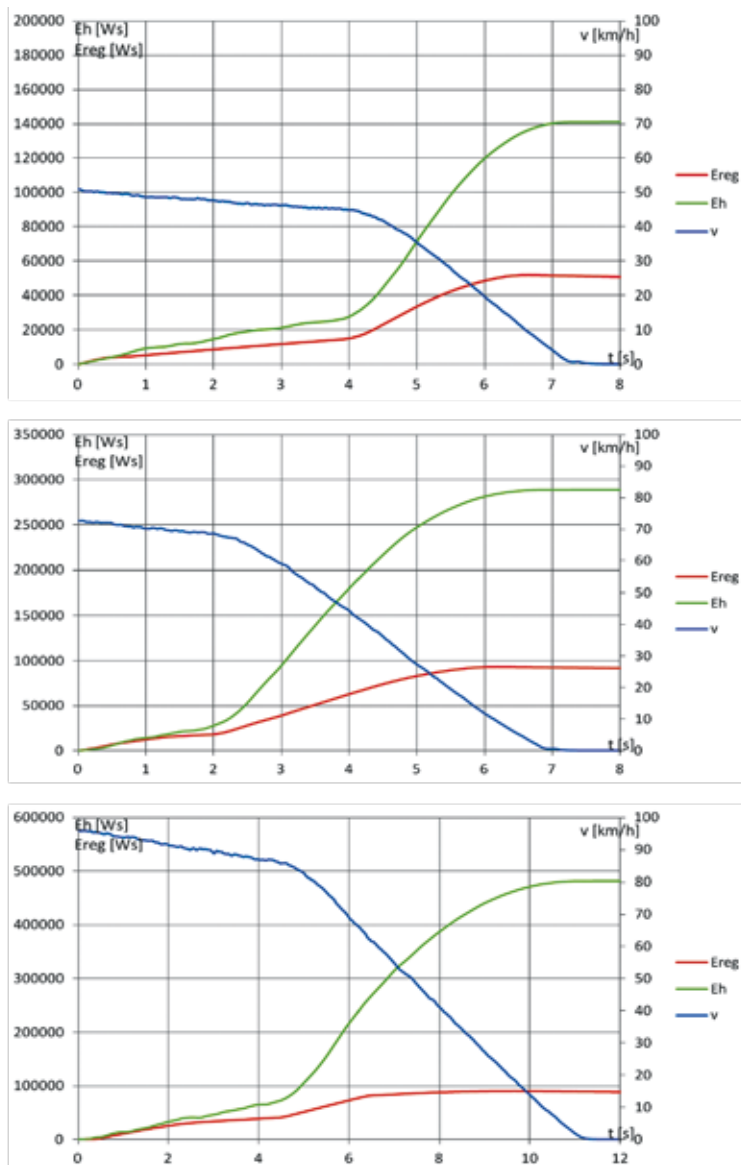
where:

U – napięcie ładowania baterii,

I – prąd ładowania baterii,

$t_2 - t_1$ – czas ładowania odzyskowego w fazie zwalniania pojazdu.

Przykładowe wyniki obliczeń energii zużywanej do zmniejszania prędkości samochodu aż do jego zatrzymania oraz energii elektrycznej odzyskanej, w funkcji czasu hamowania, dla różnych początkowych prędkości hamowania, przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Energia E_h zużyta podczas hamowania samochodu oraz energia elektryczna E_{reg} odzyskana, w zależności od czasu hamowania. Opóźnienie hamowania ($4 \div 4,5$) m/s²

Współczynnik odzysku energii hamowania obliczano jako:

$$k_{reg} = \frac{E_{reg}}{E_h} \cdot 100[\%] \quad (4)$$

Wyniki badań wskazują, że w czasie zwalniania bez nacisku na pedał hamulca, odpowiadającego hamowaniu silnikiem w pojeździe konwencjonalnym, współczynnik odzysku energii osiągał wartość około (32 ÷ 45)%. Pozostała część całkowitej energii hamowania pojazdu przypada na hamowanie silnikiem, opory ruchu układu napędowego i opory powietrza. Dla hamowań wymuszonych, w zakresie początkowych prędkości (50 ÷ 90) km/h. i opóźnień hamowania (2 ÷ 4) m/s² współczynnik odzysku energii zawierał się w szerokim zakresie: od około 16% do 45%. Wartość energii odzyskanej w pojedynczych cyklach hamowań nie przekraczała około 100 000 Ws (1 W razy 1 s to 1 J).

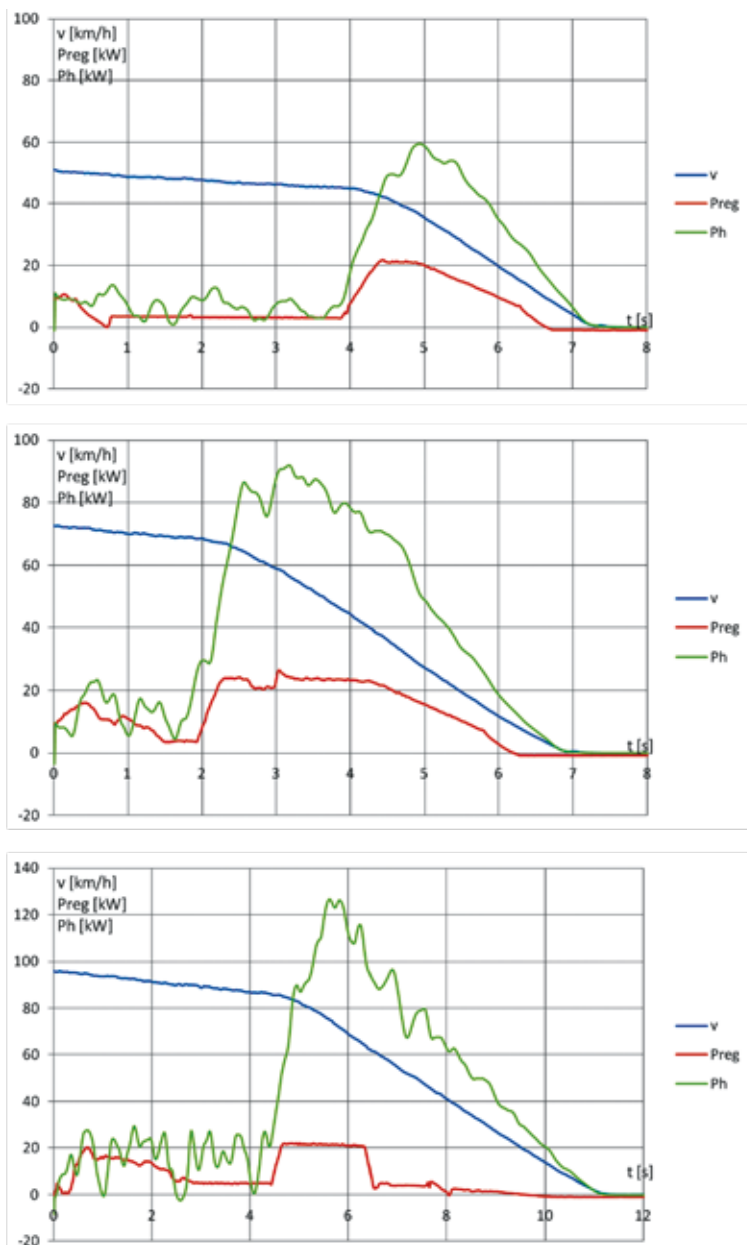
Przeanalizowano również zapotrzebowanie mocy hamowania P_h i moc hamowania odzyskowego P_{reg} , obliczanych według zależności:

$$P_h = (ma_h - c_x Av^2 \rho / 2)v(t) \quad (5)$$

$$P_{reg} = U(t)I(t) \quad (6)$$

Przykładowe wyniki przedstawiono na rys. 6.

Wyniki badań wykazały, że moc hamowania odzyskowego (elektrycznego) była 2 do 6 razy mniejsza od maksymalnego zapotrzebowania na moc hamowania. Wynika to głównie z ograniczenia mocy ładowania baterii wysokonapięciowej (dla badanego pojazdu z baterią NiH wynosiła ona około 25 kW) oraz z maksymalnej mocy, jaką może osiągnąć prądnica pojazdu w stosunku do chwilowej mocy hamowania. Przykładowo, przy początkowej prędkości 70 km/h i opóźnieniu (2 ÷ 3) m/s², początkowa moc hamowania badanego pojazdu wynosiła (60,5 ÷ 90,5) kW, wobec maksymalnej mocy generatora 50 kW. Przy początkowej prędkości 50 km/h i zakresie opóźnienia (2 ÷ 3) m/s² początkowa moc hamowania wynosiła (43 ÷ 65) kW. Przy tej prędkości współczynnik odzysku energii hamowania obliczany z zależności (4) jest większy od tego współczynnika obliczanego dla prędkości początkowej hamowania 70 km/h i 90 km/h. Ilość odzyskanej energii zależy również od stopnia naładowania baterii przed rozpoczęciem hamowania i jej stanu cieplnego.



Rys. 6. Zapotrzebowanie mocy hamowania i moc hamowania odzyskowego, dla różnych początkowych prędkości samochodu

5. Podsumowanie

Badania wykazały, że dotychczasowe rozwiązania układów odzysku energii hamowania nie wykorzystują pełnych możliwości tego procesu. Problem ten wymaga dalszych teoretycznych i praktycznych prac. Duży odzysk energii możliwy jest pod warunkiem odbioru energii mechanicznej od kół przednich i tylnych samochodu. Zamiana energii mechanicznej na elektryczną w samochodach osobowych wymaga generatorów o mocy rzędu 100 kW i większej. Rozwój techniki odzysku energii na drodze elektrycznej powinien uwzględniać problem szybkości i ilości jej gromadzenia. Stosowane baterie mają pojemność elektryczną umożliwiającą gromadzenie energii odzyskiwanej w procesie pojedynczych zahamowań. Natomiast nie pozwalają na odebranie tej energii w krótkim czasie hamowania. Mogą to zapewnić połączone układy superkondensatorów i baterii wysokonapięciowej oraz sterowanie odzyskiem energii hamowania zarówno z kół przednich, jak i tylnych pojazdu.

Superkondensatory umożliwiają gromadzenie energii w krótkim czasie, charakteryzują się dużą gęstością mocy (W/kg). Zapewniają odpowiednią moc odzysku energii, ale możliwość jej gromadzenia jest niewielka. Baterie pozwalają na gromadzenie znacznie większej ilości energii, ale w dłuższym okresie. Mają gęstość energii (Wh/kg) około 10 – krotnie większą od superkondensatorów [4]. Energia zgromadzona ma wpływ na zasięg pojazdu między ładowaniami, moc źródła energii elektrycznej wpływa na dynamikę pojazdu i szybkość odzysku energii. Stosowanie równocześnie odzysku energii przez superkondensatory i baterię zwiększa wydajność tego procesu, ale znacznie komplikuje układ elektronicznego przetwarzania energii elektrycznej.

Dotychczas praktyczne zastosowanie superkondensatorów do odzysku energii wprowadziła firma Mazda pod nazwą i-ELOOP (*Intelligent Energy Loop*) [8, 10]. Odzysk energii odbywa się poprzez ładowanie superkondensatora przez alternator pracujący z napięciem podwyższonym do 25 V. Ładunek zgromadzony w kondensatorze, poprzez konwerter DC obniżający napięcie, ładuje baterię 12 V oraz zasila odbiorniki. Praca alternatora przy napięciu podwyższonym odbywa się w czasie hamowania silnikiem i podczas normalnego hamowania.

Literatura

- [1] Burnham K. J., Gajek A., Oleksowicz S.: *Regenerative Braking Mode, Legal, Safety and Control Consideration*. Mechanika. Czasopismo Techniczne. Politechnika Krakowska 2012, nr 5M.
- [2] Burnham K. J., Oleksowicz S.: *Assessment of Hybrid Vehicle Braking Technologies*. Mechanika. Czasopismo Techniczne. Politechnika Krakowska 2012, nr 3M.
- [3] Chłopek Z.: *Badanie zużycia energii przez samochód elektryczny*. The Archives of Automotive Engineering. PIMOT, vol. 57, no 3, 2012. ISSN 1234-754X.
- [4] Informacja serwisowa Mazda 6, 2013.
- [5] Juda Z.: *Zastosowanie superkondensatorów w układzie odzysku energii pojazdu z napędem elektrycznym*. Mechanika. Czasopismo Techniczne. Politechnika Krakowska 2008, nr 6M.
- [6] Juda Z.: *Zastosowanie zaawansowanych źródeł energii w miejskich pojazdach elektrycznych z funkcją odzysku energii*. Mechanika. Czasopismo Techniczne. Politechnika Krakowska 2012, nr 5M.

- [7] Materiały Toyota Motor Corporation, Prius, 2010.
- [8] Pawelek M.: *Badania sterowania układem napędowym pojazdu hybrydowego w warunkach ruchu miejskiego*. Praca dyplomowa, 2012. Promotor A. Gajek.
- [9] Wei L.: *Hybrid Vehicle System Modeling and Control*. Published by J.Wiley & Sons - USA. 2013.
- [10] <http://motoryzacja.wnp.pl/i-loop>: Patent Mazdy na odzyskiwanie energii podczas hamowania, data dostępu 24.03.2015.