

Hamowanie odzyskowe jako efektywny sposób zwiększenia zasięgu pojazdu hybrydowego

Emil Król

1. Wstęp

Napęd hybrydowy jest połączeniem dwóch rodzajów napędów. Obecnie w pojazdach jako napęd hybrydowy najczęściej stosuje się połączenie silnika spalinowego z silnikiem elektrycznym. W większości napędów hybrydowych silnik spalinowy przenosi moment obrotowy poprzez różnego typu przekładnie lub jest połączony wspólnym wałem z silnikiem elektrycznym, który pełni również rolę prądnicy (generatora) służącej do ładowania akumulatorów pokładowych pojazdu podczas hamowania. W zależności od konfiguracji elementów napędzających wyróżnia się układy hybrydowe szeregowe, równoległe i mieszane [1]. W układzie szeregowym energia mechaniczna wytwarzana przez silnik spalinowy jest w całości przetworzona na energię elektryczną i jest gromadzona w akumulatorach, następnie, w zależności od potrzeb, jest wykorzystywana do napędu silnika elektrycznego. W przypadku dużego zapotrzebowania na moc silnik elektryczny może ją dostarczyć, wykorzystując energię zgromadzoną w akumulatorach. W układach tych nie stosuje się skrzyni biegów, silnik elektryczny ma dostateczną moc, aby mógł sam stanowić napęd pojazdu. W układzie równoległym moc mechaniczna wytworzona przez silnik spalinowy przekazywana jest na koła napędowe pojazdu, a silnik elektryczny odzyskuje część energii w trakcie hamowania lub zwalniania, ładując akumulatory pokładowe. Gdy potrzebna jest duża moc oba silniki pracują równolegle jako źródło napędu. Silnik elektryczny w napędzie równoległym nie ma dostatecznej mocy, aby sam mógł stanowić napęd pojazdu. Układ mieszany jest kombinacją cech układów równoległego i szeregowego. Do wad napędu hybrydowego należy zaliczyć większą masę pojazdu oraz wyższą cenę w porównaniu do pojazdów tylko z napędem spalinowym. Natomiast do zalet napędów hybrydowych należy zaliczyć redukcję emisji spalin samochodowych oraz ograniczenie hałasu, co skutkuje w oczywisty sposób poprawą warunków życia, szczególnie w aglomeracjach miejskich. W artykule zostanie omówiony pojazd z napędem hybrydowym bimodalnym. W tym typie napędu silnik elektryczny oraz spalinowy mogą pracować jako samodzielne napędy [2]. Oba napędy nigdy nie pracują razem, jednak silnik elektryczny może pracować jako prądnica do ładowania akumulatorów lub układ odzyskujący energię podczas hamowania, w czasie gdy głównym napędem pojazdu jest napęd spalinowy. W pojeździe można wyróżnić trzy tryby pracy:

- praca z wykorzystaniem tylko napędu spalinowego;
- praca z wykorzystaniem tylko napędu elektrycznego;

Streszczenie: W artykule przedstawiono historię oraz podstawowe rodzaje napędów hybrydowych wykorzystywanych w różnych typach pojazdów. Omówiono zasadę działania wykonanego pojazdu dostawczego z napędem hybrydowym bimodalnym. Przeprowadzono analizę wykorzystania tego pojazdu w ruchu miejskim oraz pozamiejskim, oszacowano ilość energii, jaką można odzyskać podczas hamowania regeneracyjnego, oraz jak ta odzyskana energia wpływa na zwiększenie zasięgu pojazdu.

Abstract: Van with bimodal hybrid drive has been presented in the paper. The history and basic types of hybrid drives used in various types of vehicles. Discusses the principles of operation, of the van vehicle made hybrid bimodal. An analysis of the use of the vehicle in urban and extra-urban traffic, estimated the amount of energy that could be recovered during regenerative braking, and how this influences the recovered energy to increase the range of the vehicle.

- praca, w której używany jest silnik spalinowy jako główny napęd, a silnik elektryczny pracuje jako prądnica ładująca akumulatory pokładowe lub hamuje regeneracyjnie. Tryb pracy, w którym ładujemy akumulatory z wykorzystaniem silnika Diesla, jest traktowany jako awaryjny, ponieważ jest nieopłacalny ekonomicznie. Znacznie korzystniej ekonomicznie jest naładować akumulatory z sieci energetycznej niż używać silnika spalinowego do jazdy oraz równoczesnego ładowania akumulatorów pokładowych.

2. Historia pojazdów z napędami hybrydowymi

Samochody hybrydowe zaczęto budować już na początku XX wieku. Pierwszy samochód hybrydowy wyprodukowała firma Lohner. Projektantem samochodu był Ferdynand Porsche [3]. Samochód był wyposażony w silnik benzynowy oraz dwa silniki elektryczne o mocy maksymalnej 5,2 kW każdy [4], umieszczone w piastach przednich kół. Pojazd był bardzo skomplikowany mechanicznie. W 1901 r. kosztował w zależności od wersji od 2900 USD do 6850 USD, co w przeliczeniu na obecną wartość wynosiłoby około 260 tys. zł do 650 tys. zł. Tak wysoka cena pierwszego samochodu z napędem hybrydowym była przyczyną porażki rynkowej tego modelu.



Rys. 1. Lohner-Porsche Mixte – pierwszy samochód z napędem hybrydowym

fol. www.diarionmotor.com

Na kolejny seryjny pojazd z napędem hybrydowym trzeba było czekać prawie 90 lat. W roku 1989 firma Audi zaprezentowała swój pojazd z napędem hybrydowym o nazwie duo [5]. Model Audi duo był wyposażony w silnik wysokoprężny i silnik elektryczny oraz był ponaddwukrotnie droższy od swojego odpowiednika z silnikiem benzynowym. Sprzedano kilkadziesiąt sztuk tego modelu i zaprzestano produkcji. Po kolejnej dekadzie Toyota przedstawiła model Prius. Toyota Prius była pierwszym samochodem z napędem hybrydowym, który był sprzedawany masowo. Od tego modelu rozwój napędów hybrydowych znacznie przyspieszył. Większość dużych koncernów samochodowych opracowała i wdrożyła do produkcji własne napędy hybrydowe.

3. Napęd hybrydowy bimodalny w pojeździe dostawczym

Napęd hybrydowy bimodalny może pracować w dwóch całkowicie niezależnych trybach i stąd nazwa: napęd hybrydowy bimodalny. W trybie pierwszym, który można określić jako „tryb diesel”, samochód jest napędzany wyłącznie przez montowany fabrycznie standardowy silnik spalinowy (dla samochodu dostawczego jest to zwykle silnik Diesla). Tryb diesel jest wykorzystywany do przejazdów pozamiejskich na dłuższych trasach. Ponieważ samochód jest w tym trybie napędzany przez silnik Diesla współpracujący ze standardową skrzynią biegów, nie ulega ograniczeniu zasięg jazdy oraz prędkość maksymalna w porównaniu do pojazdu wyposażonego tylko w napęd spalinowy [2]. Niewielkiemu pogorszeniu ulegnie dynamika pojazdu, ponieważ akumulatory i silnik elektryczny podnoszą masę własną pojazdu. W napędzie bimodalnym silnik elektryczny w trybie Diesel będzie pracował tylko jako prądnica doładowująca baterie akumulatorów podczas hamowania lub dojeżdżania do skrzyżowania oraz podczas ładowania akumulatorów z użyciem silnika Diesla.

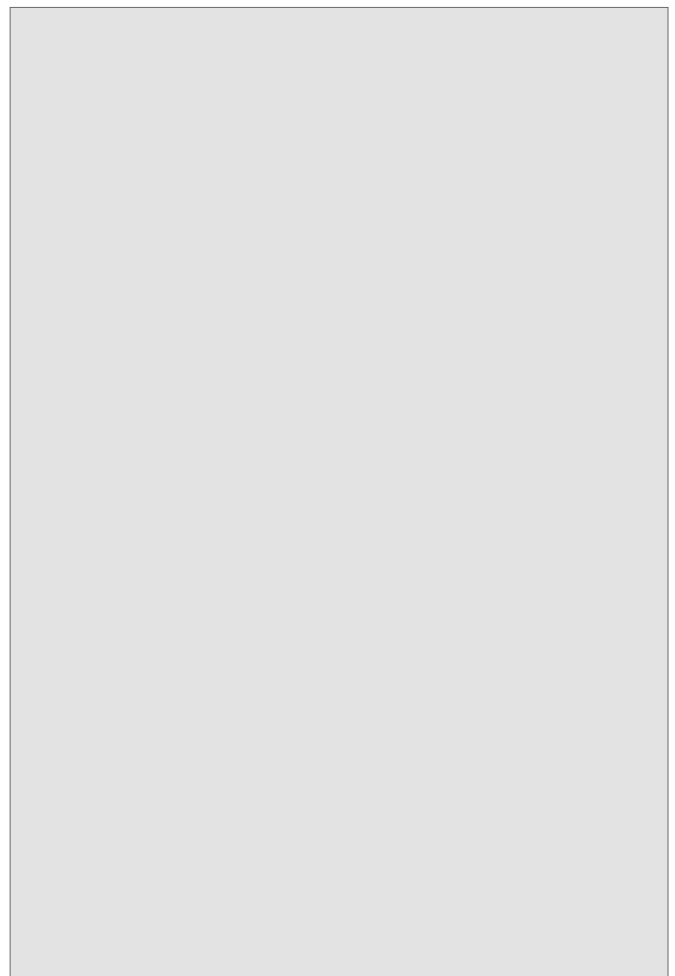
W drugim trybie napędu samochód będzie napędzany wyłącznie przez silnik elektryczny. Tryb elektryczny jest wyko-

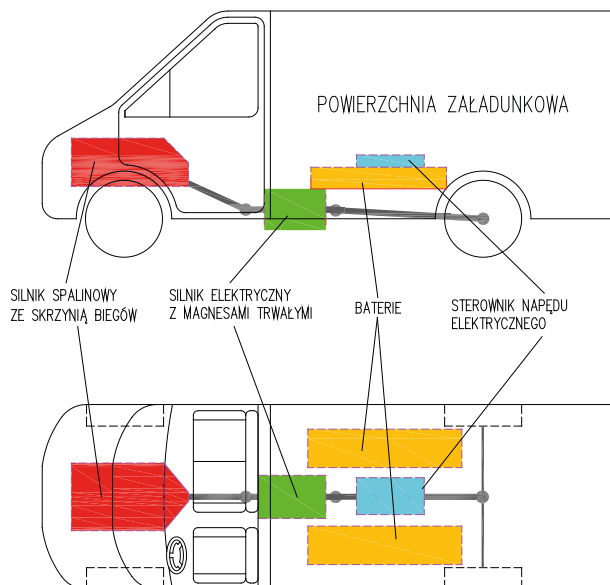
rzystywany na terenie aglomeracji miejskich miast lub terenów zabudowanych.

Ze względu na wykorzystanie wyłącznie silnika elektrycznego tryb elektryczny napędu pojazdu charakteryzuje się dużą czystością ekologiczną. Zredukowana zostanie do zera emisja szkodliwych spalin i CO₂ do atmosfery oraz zdecydowanie ograniczony zostanie hałas generowany przez pracujący silnik spalinowy. W produkowanym seryjnie samochodzie dostawczym Honker Cargo (dawniej: DZT Pasagon), który wykorzystuje napęd na oś tylną, oprócz tradycyjnego silnika spalinowego jest zamontowany nowoczesny silnik synchroniczny z magnesami trwałymi. Rozmieszczenie elementów napędu hybrydowego bimodalnego pokazano na rys. 2. Zgodnie z założeniami silnik spalinowy powinien być wykorzystywany do przejazdów na dłuższych odcinkach poza miastami lub poza terenami zabudowanymi. Na obszarze miast (terenów zurbanizowanych) głównym napędem jest silnik elektryczny. Jednak jeżeli zasięg pojazdu na to pozwala, to napędu elektrycznego można używać również poza miastem.

Jazda w miastach charakteryzuje się częstym hamowaniem, postojami oraz ruszaniem w korkach lub ze skrzyżowań. Taki tryb pracy jest bardzo niekorzystny i nieekonomiczny dla napędu z silnikiem spalinowym, ponieważ charakterystyka momentu silnika spalinowego jest tak ukształtowana, że optymalny punkt pracy jest osiągany przy wyższych prędkościach obrotowych. Silniki spalinowe podczas przyspieszania są źródłem

reklama





Rys. 2. Rozmieszczenie elementów napędu hybrydowego bimodalnego

szczególnie dużej emisji szkodliwych zanieczyszczeń do atmosfery oraz źródłem znacznego hałasu. Wykorzystanie napędu elektrycznego w samochodach osobowych i dostawczych poruszających się po terenach miejskich powinno spowodować istotne ograniczenie zanieczyszczeń powietrza i ograniczenie hałasu, co istotnie wpłynie na podniesienie jakości życia w aglomeracjach miejskich, ze szczególnym uwzględnieniem miejskich szlaków komunikacyjnych.

4. Hamowanie odzyskowe

Wszystkie pojazdy uczestniczące w ruchu drogowym są wyposażone w układy hamulcowe, których zadaniem jest zmniejszenie prędkości lub zatrzymanie pojazdu, jeżeli kierowca lub sytuacja tego wymaga. W większości obecnych pojazdów z napędem spalinowym podczas hamowania energia kinetyczna pojazdu jest wytracona w postaci ciepła w układzie hamulcowym. Energia ta jest bezpowrotnie tracona, jednak w przypadku pojazdu z napędem hybrydowym znaczną część tej energii można odzyskać. Przy odpowiednio skonfigurowanym układzie odzyskiwania energii oraz z odrobiną wyczucia kierowcy pojazdu można odzyskać około 75% energii traconej podczas hamowania. Pozostała część energii zostanie wytracona na ciepło oraz opory toczenia podczas końcowego stadium zatrzymania pojazdu, gdzie hamowanie odzyskowe jest już słabe i nieefektywne. Układ hamulcowy pojazdu hybrydowego powinien być tak skonfigurowany, aby już przy niekorzystaniu z pedału przyspieszenia silnik elektryczny odzyskiwał część energii. Ten stan ma odpowiadać hamowaniu silnikiem w pojeździe spalinowym. Jeżeli kierowca zacznie naciskać pedał hamulca, to do czasu zadziałania hamulca ciernego powinno się odzyskiwać większość energii hamowania. Pedał hamulca powinien być czujnikowany, aby poprzez jego ruch można było regulować hamowanie odzyskowe. Taki sposób odzyskiwania energii hamowania wymusza jednak na kierowcy, aby jak najdłużej utrzymywał stan delikatnie naciśniętego pedału hamulca, ale

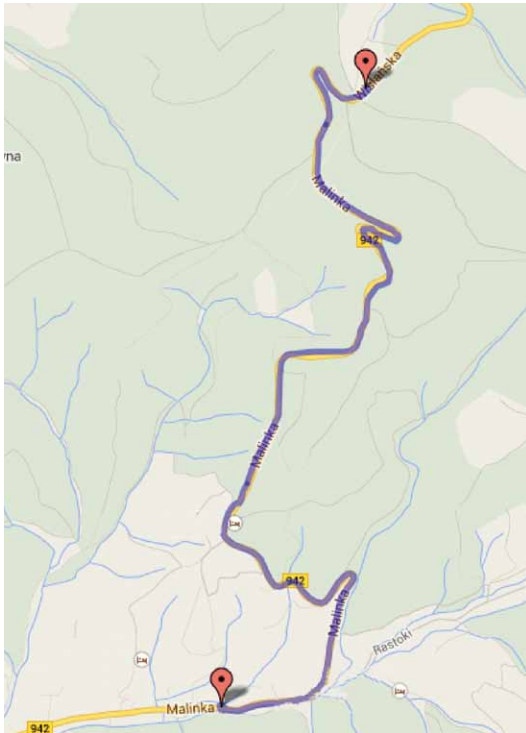
jeszcze nie używał hamulców ciernych. W kolejnym stadium hamowania działają oba typy hamulców: odzyskowe i cierne. Odpowiednie doświadczenie kierowcy i przewidywanie sytuacji drogowej pozwala wcześniej rozpocząć hamowanie odzyskowe i zminimalizować zużycie elementów ciernych układu hamulcowego oraz zmaksymalizować ilość odzyskanej energii. Zgodnie z powyższymi zasadami zmodyfikowano klasyczny układ hamulcowy w pojeździe Honker Cargo. Po przerobieniu na pojazd hybrydowy bimodalny pojazd osiąga następujące parametry z wykorzystaniem napędu elektrycznego:

- maksymalny zasięg jazdy – 100 km;
- prędkość maksymalna – 70 km/h;
- pojemność energetyczna akumulatora trakcyjnego – 21 kWh;
- czas ładowania baterii – ok. 3 godzin (dla ładowarki 3-fazowej);
- czas ładowania baterii – ok. 8 godzin (dla ładowarki 1-fazowej);
- ładowarki zamontowane są stałe w samochodzie, ładowanie ze standardowego gniazda elektrycznego 1-fazowego lub 3-fazowego;
- moc znamionowa silnika elektrycznego – 45 kW;
- moc maksymalna silnika elektrycznego – 70 kW;
- maksymalny moment silnika elektrycznego – 520 Nm;
- w trybie elektrycznym praca bez wykorzystania skrzyni biegów (dźwignia zmiany biegów w pozycji neutralnej).

Do analizy teoretycznej efektywności hamowania odzyskowego użyto pojazdu dostawczego obciążonego ładunkiem 500 kg. Przeprowadzono analizę jazdy tego pojazdu tylko z napędem spalinowym przed przebudową na hybrydowy oraz po wykonaniu hybrydyzacji. Przyjmując następujące założenia:

- pojazd w ruchu miejskim porusza się przez 8 godzin dziennie, zakładając że hamuje 10 razy na godzinę w korkach z prędkości 50 km/h do 0 km/h;
- masa pojazdu przed przeróbką na hybrydowy z ładunkiem i kierowcą (75 kg) wynosi 2735 kg, pojazd podczas 8 godzin pracy traci podczas hamowania około 5,86 kWh energii. Dla pojazdu po przeróbce na hybrydowy masa własna pojazdu wzrasta do 2600 kg, natomiast masa pojazdu z ładunkiem i kierowcą wynosi 3175 kg. Przyjmując takie same założenia pracy w ruchu miejskim, jak dla pojazdu z napędem spalinowym, pojazd ten traci podczas hamowania około 6,8 kWh energii. Zakładając, że pojazd z napędem prowadzi kierowca, który nie hamuje gwałtownie i przewiduje sytuację drogową, będzie mógł odzyskać około 5,1 kWh energii, która pozwoli mu na przejechanie kolejnych 24 km z napędem elektrycznym w ruchu miejskim. Dodatkową korzyścią dla kierowcy będzie wydłużenie pracy układu hamulcowego, ponieważ elementy cierne układu hamulcowego będą zużywać się wolniej. Następnie przeprowadzono badania pojazdu hybrydowego bimodalnego w terenie. W tym celu zarejestrowano przejazd pojazdem z przełęcz Salmopol do miejscowości Malinka. Przebieg trasy przedstawiono na rys 3.

Trasa przejazdu przebiegała cały czas w dół i miała długość 5,8 km oraz różnicę wysokości 360 m. Pojazd wykorzystywał wyłącznie napęd elektryczny pracujący przy hamowaniu odzyskowym. Pojazd przewoził ładunek o masie 500 kg, łącznie z kierowcą całkowita masa pojazdu wynosiła około 3175 kg. Po



Rys. 3.
Przebieg trasy badania hamowania odzyskowego pojazdu hybrydowego bimodalnego

przejechaniu całej trasy, na podstawie wskazań systemu monitorującego zasobnik energii, odzyskano 9% energii akumulatora, co stanowiło około 1,9 kWh. Przeprowadzając analizę przejazdu, możemy wyliczyć, że z różnicy wzniesień pojazd zmniejszył swoją energię potencjalną o 3,1 kWh. Z zasięgu pojazdu możemy wyliczyć, że na pokonanie oporów ruchu na odcinku 5,8 km pojazd potrzebuje 1,2 kWh. Różnica tych energii wynosi 1,9 kWh. Zjeżdżając z góry, pojazd odzyskał energię, dzięki której będzie mógł przejechać kolejne 9 km z wykorzystaniem tylko napędu elektrycznego. W przypadku pojazdu z napędem spalinowym energia ta uległaby bezpowrotnej utracie.

Podsumowanie

Zastosowanie w pojeździe napędu hybrydowego bimodalnego pozwoli w znacznym stopniu ograniczyć koszty eksplo-

atacji pojazdu oraz zmniejszyć oddziaływanie na środowisko naturalne. Jeśli dodatkowo zostanie wykorzystane hamowanie odzyskowe, można zmniejszyć koszty eksploatacji pojazdu oraz zmniejszyć zanieczyszczanie środowiska, które jest szczególnie uciążliwe dla mieszkańców dużych aglomeracji miejskich. Koszt przejechania 100 km pojazdem dostawczym z silnikiem Diesla to ok. 60 zł poza miastem (bez kosztów amortyzacji pojazdu). Natomiast w ruchu miejskim, ze względu na małą prędkość poruszania się oraz częste postoje i przyspieszenia koszt ten wynosi około 80 zł. Tymczasem koszt przejechania 100 km w ruchu miejskim pojazdem napędzanym silnikiem elektrycznym nie powinien przekroczyć 11 zł ($21\text{kWh} \times 0,5\text{ zł}$). Zatem dla użytkowników pojazdów transportowych wyposażonych w silniki elektryczne, np. firm kurierskich, pojawia się możliwość znacznego obniżenia kosztów działalności. Znaczne oszczędności ekonomiczne wynikające z zastosowania napędu elektrycznego spowodują szybki zwrot nakładów poniesionych na jego zainstalowanie w pojazdach.

Literatura

- [1] KRÓL E., BIAŁAS A.: *Koncepcja napędu hybrydowego przeznaczonego do samochodu dostawczego*. Zeszyty problemowe „Maszyny Elektryczne”, BOBRME Komel 1/2012.
- [2] KRÓL E., ROSSA R.: *Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi, jako napęd pojazdu hybrydowego*. Zeszyty Problemowe „Maszyny Elektryczne”, BOBRME Komel 4/2012.
- [3] <http://press.porsche.com/news/release.php?id=642>
- [4] <http://en.wikipedia.org/wiki/Lohner-Porsche>
- [5] http://en.wikipedia.org/wiki/Audi_hybrid_vehicles

Praca finansowana ze środków NCBiR w ramach projektu rozwojowego nr NR01-0085- 10/2010

 mgr inż. Emil Król – Instytut Maszyn i Napędów Elektrycznych KOMEL, e-mail: e.krol@komel.katowice.pl

artykuł recenzowany