

Emil Król, Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice
Wojciech Skęczek, Handel i Usługi Wojciech Skęczek, Pszczyna

AUTOBUS MIEJSKI Z NAPĘDEM SPALINOWO-ELEKTRYCZNYM - WYNIKI BADAŃ DROGOWYCH

CITY BUS DRIVEN BY DIESEL-ELECTRIC DRIVE - ROAD TESTS RESULTS

Streszczenie: W artykule przedstawiono opis badań pojazdu wyposażonego w napęd hybrydowy bimodalny, dzięki któremu zostały zasymulowane przejazdy mikrobusu mającego przewozić ludzi na terenach miejskich oraz podmiejskich. Przeprowadzono testy zarówno z napędem spalinowym jak i elektrycznym. Badania wykonano na trasie przejazdu autobusu podmiejskiego w trakcie normalnego ruchu ulicznego, zatrzymując pojazd na każdym przystanku. Przeprowadzono analizę ekonomiczną, porównano prędkości przejazdu oraz ilości zużytej energii elektrycznej oraz paliwa. Wykonano analizę techniczną przejazdów z wykorzystaniem obu typów napędu.

Abstract: This paper presents a description of the vehicle testing hybrid bimodal, with which the van rides were simulated having public transport in urban and suburban areas. Tests were performed with both combustion engines and electric. The tests were made on a route bus during normal suburban traffic, stopping the vehicle at each bus stop. Prepared an economic analysis, compared the running speed and the amount of electricity consumed and fuel. Prepared analysis of the using both types of drive in minibus.

Słowa kluczowe: elektryczny autobus, autobus hybrydowy, napęd elektryczny, minibus
Key words: electric bus, bus hybrid electric drive minibus

1. Wstęp

Autobusy z napędem elektrycznym są już używane w wielu polskich miastach do przewożenia pasażerów na trasach miejskich. Napęd spalinowo-elektryczny daje możliwość jazdy w centrach miasta z napędem elektrycznym bez emisji szkodliwych zanieczyszczeń oraz poruszania się poza miastami z napędem spalinowym [5]. Kolejną opcją przy wykorzystaniu napędu elektrycznego jest możliwość ruszania na napędzie elektrycznym, kontynuowania jazdy ustalonej z użyciem napędu spalinowego oraz hamowania napędem elektrycznym z wykorzystaniem odzysku energii kinetycznej [1, 4]. W celu sprawdzenia możliwości wprowadzenia autobusu miejskiego z napędem spalinowo-elektrycznym w mieście Pszczyna, przeprowadzono badania terenowe z wykorzystaniem zastępczego pojazdu z napędem spalinowo-elektrycznym. W Pszczynie nigdy nie istniała komunikacja zbiorowa, która zapewniałaby dojazd do centrum miasta z różnych dzielnic Pszczyny. Jedyną firmą przewozową, PKS Pszczyna sp. z o.o. do końca lat 90 ubiegłego wieku realizowała komunikację międzymiastową, która zapewniała części mieszkańcom dojazd od centrum miasta. Brak bezpośredniego dojazdu z dzielnic miasta do centrum w week-

endy oraz zajęte parkingi i drogi dojazdowe do centrum przez odwiedzających Pszczynę turystów (włączając w to mieszkańców sąsiednich gmin) zniechęca mieszkańców Pszczyny do aktywnego uczestnictwa w życiu miasta. Utworzenie jednej linii komunikacyjnej z wykorzystaniem małego autobusu z napędem elektrycznym, która będzie łączyła poszczególne dzielnice Pszczyny poprawiłoby warunki życia społecznego i przyczyniłoby się do rozwoju ekologicznego miasta.

2. Badania terenowe - charakterystyka zastępczego pojazdu z napędem spalinowo-elektrycznym

Jako pojazd zastępujący autobus z napędem spalinowo-elektrycznym wybrano samochód Honker Cargo (dawniej DZT Pasagon), w którym oprócz tradycyjnego silnika spalinowego zamontowano nowoczesny silnik elektryczny [3,5]. Pojazd ten obciążono ładunkiem około 1000 kg w celu symulacji obecności pasażerów. Silnik spalinowy jest wykorzystywany do przejazdów na dłuższych odcinkach poza miastami lub poza terenami zabudowanymi. Na obszarze miast rolę głównego napędu stanowi silnik elektryczny. O wyborze typu napędu decy-

duje kierowca. Napęd samochodu może pracować w dwóch całkowicie niezależnych trybach napędowych. W trybie pierwszym, który można określić, jako „tryb diesel”, samochód jest napędzany wyłącznie przez fabryczny silnik spalinowy. Silnik elektryczny w trybie diesel może działać, jako prądnica doładowująca baterie akumulatorów oraz prądnica wykorzystywana do hamowania odzyskowego [5] (tryby pracy napędu elektrycznego można modyfikować podczas jazdy). W drugim trybie napędu, samochód będzie napędzany wyłącznie przez silnik elektryczny. „Tryb elektryczny” jest przewidziany do wykorzystania na terenie aglomeracji miejskich lub terenów zabudowanych.

Ze względu na wykorzystanie wyłącznie silnika elektrycznego w trybie elektrycznym napęd 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.

Parametry napędu elektrycznego:

- maksymalny zasięg jazdy – 100 km;
- prędkość maksymalna – 70 km/h;
- pojemność energetyczna akumulatora trakcyjnego – 21 kWh;
- moc znamionowa - 45 kW;
- moc maksymalna - 70 kW;
- maksymalny moment silnika - 520Nm;
- w trybie elektrycznym praca bez wykorzystania skrzyni biegów (dźwignia zmiany biegów w pozycji neutralnej);
- silnik elektryczny napędza bezpośrednio wał

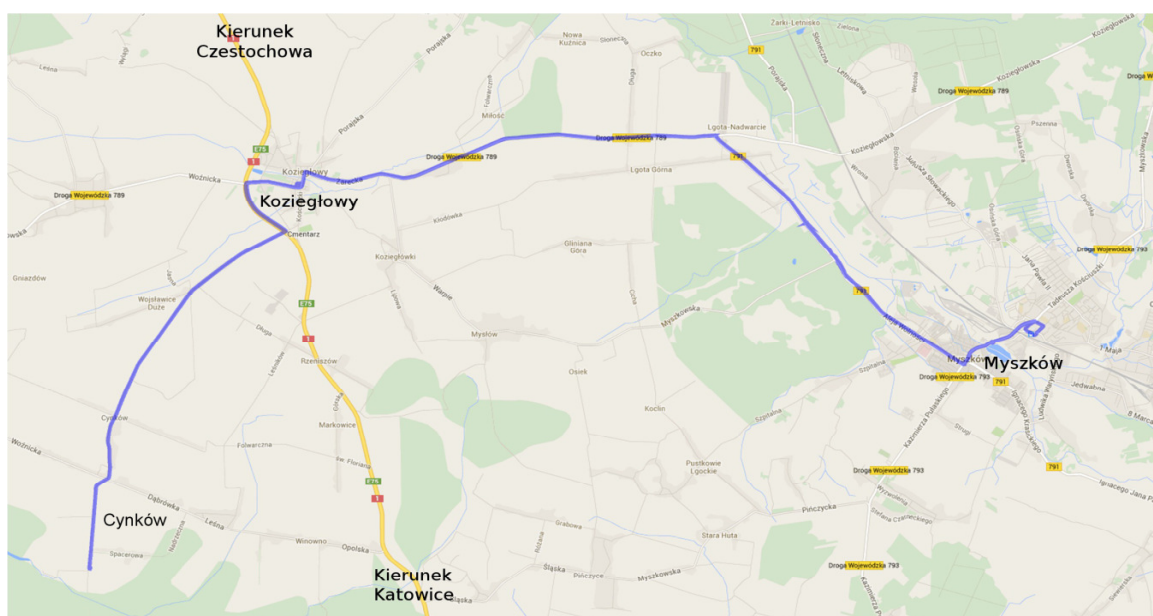
napędowy pojazdu przed mostem z mechanizmem różnicowym;

- odzysk energii przy hamowaniu pojazdu także w trybie diesel;
- możliwość ładowania baterii podczas jazdy w trybie „diesel”;
- koszt przejazdu 100 km w obszarze zabudowanym na napędzie elektrycznym wynosi ok. 12zł.

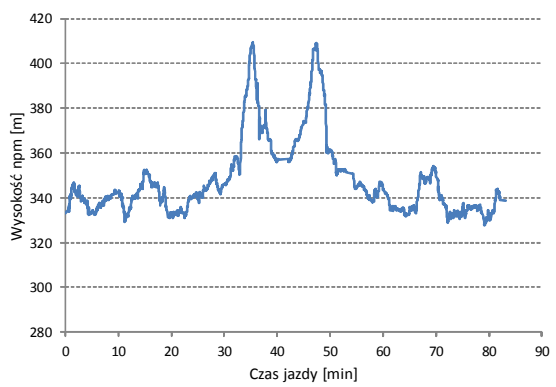
3. Charakterystyka przeprowadzonych pomiarów

Celem przeprowadzonych pomiarów było doświadczalne sprawdzenie, na konkretnej wybranej trasie rzeczywistych poborów energii elektrycznej zużywanej przez pojazd elektryczny oraz porównanie otrzymanych wyników zużycia energii elektrycznej oraz paliwa z analogicznym samochodem z silnikiem spalinowym.

W ten sposób określono rzeczywiste koszty przejechanego 1 km na napędzie elektrycznym oraz na napędzie spalinowym, przy identycznych założeniach - taka sama trasa, tak samo załadowany samochód, tyle samo przystanków. Do realizacji badań została wytypowana trasa autobusu podmiejskiego o długości ok. 50 km. Długość trasy odpowiadała 2-3 przejazdom pętli autobusu miejskiego. W celu symulacji pasażerów, samochód został obciążony ładunkiem o masie 1000 kg oraz zatrzymywał się na zaplanowanych przystankach (postój trwał 10 sekund).



Rys. 1. Przebieg badanej trasy autobusowej



Rys. 2. Przebieg trasy z uwzględnieniem wysokości nad poziomem morza

Samochód prowadził zawodowy kierowca autobusu, który regularnie jeździ na badanej trasie. Wytypowana trasa przebiegała przez: Myszków - Koziegłowy - Cynków - Koziegłowy - Myszków. Przebieg testowej trasy pokazano na rys.1. Na rys. 2 pokazano zmianę wysokości trasy nad poziomem morza. Minimalne usytuowanie drogi względem poziomu morza to 328 m n.p.m, natomiast wysokość maksymalna to 408 m. Jest to istotne dla napędu elektrycznego, gdyż podczas hamowania można odzyskać dodatkową energię, co w przypadku silnika spalinowego jest niemożliwe. Przedstawiona na mapie trasa (rys. 1) przejazdu była identyczna zarówno dla napędu spalinowego, jak również dla napędu elektrycznego. W dalszej części artykułu przedstawiono szczegóły przeprowadzonych jazd.

4. Badania z wykorzystaniem napędu spalinowego

Podczas badań jazdy samochodem z użyciem silnika spalinowego, napęd elektryczny pracował w trybie doładowywania akumulatorów (ustawiono odzysk tylko przy hamowaniu). Hamowanie odzyskowe w pojeździe Pasagon działa dwuetapowo zarówno w trybie elektrycznym, jak również w trybie „diesel”. W pierwszym etapie hamowanie odzyskowe jest uruchamiane, gdy kierowca nie używa pedału przyspieszenia, jest to odpowiednik hamowania silnikiem w samochodzie spalinowym. Drugi etap hamowania odzyskowego jest aktywowany w przypadku użycia przez kierowcę pedału hamulca, pedał hamulca jest odczytywany i informacja o jego „wychyle” jest przekazywana do komputera pokładowego (ECU) pojazdu, a następnie ECU reguluje siłę hamowania elektrycznego w zależności od wychylenia pedału hamulca [1, 4]. ECU jest tak

skonfigurowane, aby pozwalało odzyskać jak największą energię podczas hamowania w czasie, w którym hamulce cierne jeszcze nie pracują z pełną wydajnością.

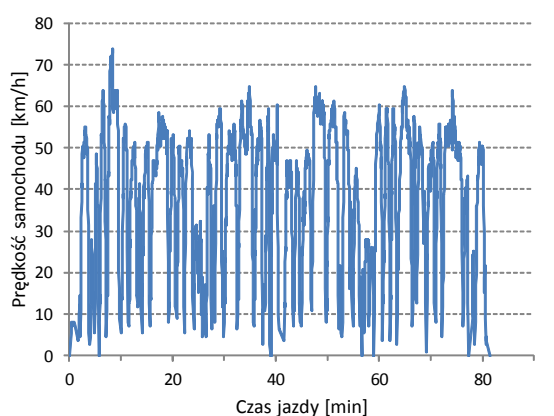
Badana trasa miała długość 47 km i 260 m, a czas przejazdu wynosił ponad 80 minut, ze średnią prędkością nieco ponad 35 km/h. Podstawowe wyniki zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie najważniejszych parametrów badania z wykorzystaniem napędu spalinowego

1	Pokonywany dystans [km]	47,26
2	Maksymalna prędkość [km/h]	72,87
3	Czas przejazdu [min]	80,77
4	Średnia prędkość [km/h]	35,11
5	Ilość energii zużytej, którą należy dostarczyć z zewnątrz [kWh]	0,62
6	Ilość odzyskanej energii [kWh]	0,92
7	Całkowita zużyta energia [kWh]	- 0,31
8	Zużycie kWh/100 km	1,31

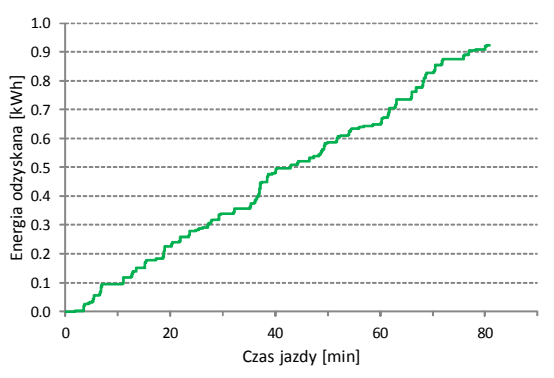
Podczas jazdy z napędem spalinowym, na badanym odcinku 47 km, zużyto 6.6 litra oleju napędowego, co w przeliczeniu na 100 km wynosi 14 l/100 km. Samochód, który wykorzystano do badań posiada dwa napędy: spalinowy i elektryczny, które mogą pracować oddzielnie. Należy zauważyć, że przy jeździe tylko z napędem elektrycznym, takie układy jak wspomaganie kierownicy, wspomaganie układu hamulcowego realizowane jest poprzez dodatkowe silniki elektryczne, które zużywają energię elektryczną, to jest przyczyną zużycia 0,62 kWh energii podczas jazdy z napędem spalinowym. Kolejny wykres przedstawia prędkość samochodu oraz wartość odzyskanej z hamowania energii elektrycznej (rys. 3 i 4).

Na rysunku 3 przedstawiono prędkość samochodu na całej badanej trasie. Prędkość była wymuszona sytuacją na drodze (obszar zabudowany, światła na skrzyżowaniach lub przejściach dla pieszych) oraz przystankami związanymi z przewozem ludzi. Na rysunku 3 trudno jest zauważyć przebieg hamowania oraz zatrzymania, wynika to czasu próbkowania i zapisywania pozycji przez moduł GPS.



Rys. 3. Napęd spalinowy - prędkość samochodu na całej trasie przejazdu

Czas postoju wynosił ok. 10 sekund, jednak ze względu na niską rozdzielczość próbkowania i zapisywania pozycji GPS, planowane postoje nie zostały prawidłowo zarejestrowane. Dane napędu elektrycznego były rejestrowane co 0,1 s.



Rys. 4. Napęd spalinowy - przyrost energii odzyskiwanej z hamowania elektrycznego

Na rys. 4 przedstawiono wartość energii elektrycznej, jaką odzyskano podczas hamowania regeneracyjnego. Napęd elektryczny wyposażony w silnik synchroniczny z magnesami trwałymi pozwala płynnie przechodzić od napędu do hamowania regeneracyjnego [3]. W całym badanym 80-minutowym okresie jazdy odzyskano prawie 1 kWh energii elektrycznej, co stanowi 4,4 % znamionowej pojemności akumulatora [5].

5. Badania z wykorzystaniem napędu elektrycznego

Podczas przejazdu samochodem używając tylko napędu elektrycznego, silnik spalinowy nie pracował. Wszystkie układy wspomagania hamulców, kierownicy, oświetlenia pojazdu itp. zasilane są pośrednio z baterii głównej. Hamowanie samochodu odbywa się trzystopniowo, tj. dwu-

stopniowego hamowania elektrycznego (regeneracyjnego) oraz hamowania mechanicznego. Podobnie jak w innych samochodach wyposażonych w napęd elektryczny [1,4,6].

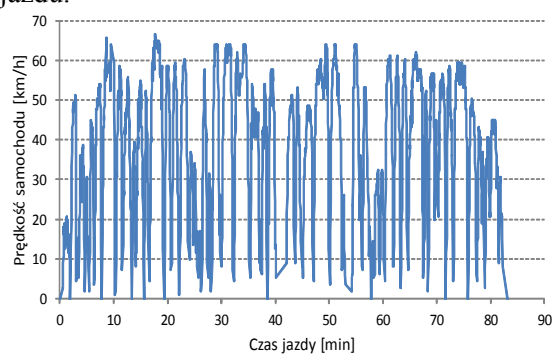
Badana trasa miała długość 47 km i 110 m, a czas przejazdu wynosił ponad 80 minut, ze średnią prędkością bliską 35 km/h, czyli bardzo podobnie, jak w przypadku jazdy samochodem z użyciem silnika spalinowego. Podstawowe wyniki zamieszczono w tabeli 2.

Tabela.2. Zestawienie najważniejszych parametrów badania z wykorzystaniem napędu elektrycznego

1	Pokonany dystans [km]	47,11
2	Maksymalna prędkość [km/h]	64,87
3	Czas przejazdu [min]	80,78
4	Średnia prędkość [km/h]	34,99
5	Ilość energii zużytej, która należy dostarczyć z zewnątrz [kWh]	-14,81
6	Ilość odzyskanej energii [kWh]	1,11
7	Całkowita zużyta energia [kWh]	-15,93
8	Zużycie kWh/100 km	31,44
9	Zasięg teoretyczny [km]	66,78

Na rysunku 5 przedstawiono prędkość samochodu na całej badanej trasie.

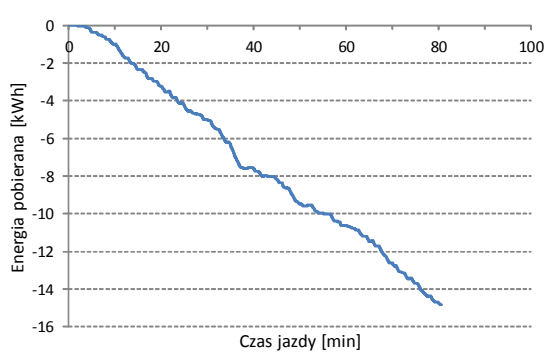
Podobnie jak w przypadku rejestracji jazd z napędem spalinowym (rys. 3), tutaj również nie zostały prawidłowo zapisane punkty prędkości chwilowej z hamowania oraz zatrzymania pojazdu.



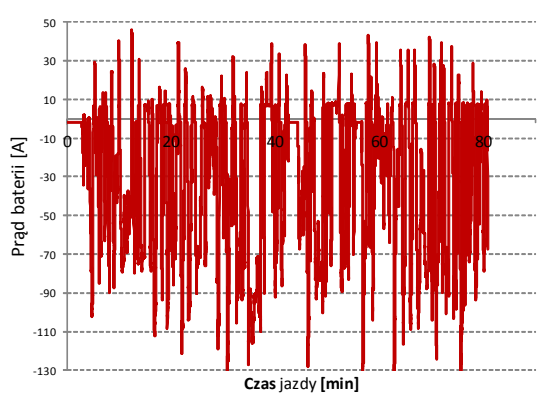
Rys. 5. Napęd elektryczny - prędkość samochodu na całej trasie przejazdu

Rysunek 6 przedstawia ilość pobranej energii elektrycznej z akumulatora głównego podczas przejazdu testowej trasy. Na wykresie można zauważyć zwiększone zużycie energii (około 35 minuty jazdy). Związane jest to z pokonywaniem znacznych różnicy wysokości - podjazd pod górę (co pokrywa się z wykresem przed-

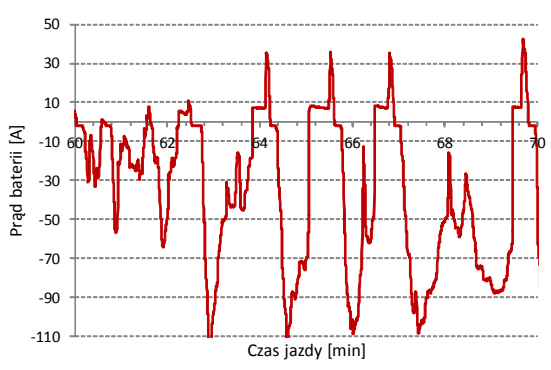
stawionym na rys. 2), a następnie bardzo niewielkie zużycie energii podczas zjeżdżania ze wzniesienia (około 37 minuty).



Rys. 6. Napęd elektryczny - energia elektryczna pobierana przez samochód



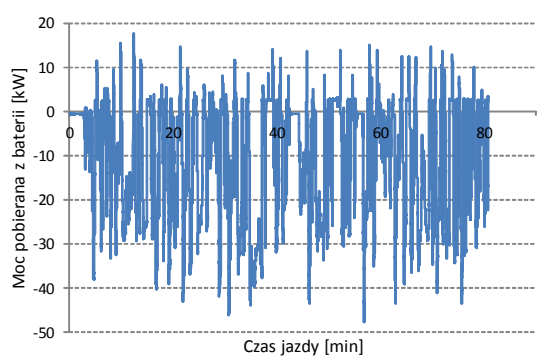
Rys. 7. Napęd elektryczny - wartość chwilowa prądu baterii



Rys. 8. Napęd elektryczny - wartość chwilowa prądu baterii - okres 10 minut

Na rysunkach 7 oraz 8 przedstawiona jest chwilowa wartość prądu baterii z głównego akumulatora. Wartości ujemne wskazują na pobór energii koniecznej do jazdy samochodem, natomiast wartości dodatnie wskazują na odzysk podczas hamowania. Wykresy te pośrednio pokazują użycie pedału przyspieszenia lub hamulca przez kierowcę samochodu. Na rysunku 8 można zauważyć, że prądy dodatnie (podczas hamowania) mają wartość stałą. Ten

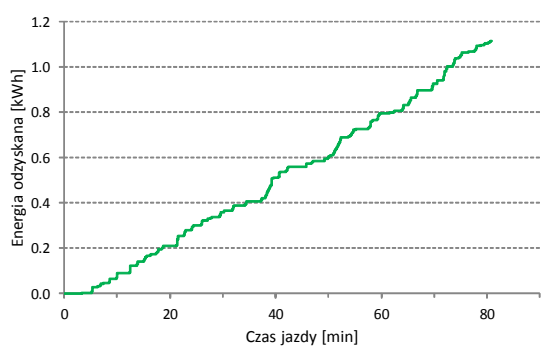
okres hamowania regeneracyjnego jest odpowiednikiem hamowania silnikiem w samochodzie z napędem spalinowym. W dalszej kolejności następuje gwałtowny wzrost prądu hamowania i jest on związany z użyciem pedału hamulca przez kierowcę. W tym czasie nie działa jeszcze hamowanie mechaniczne. Później następuje hamowanie mechaniczne i prąd maleje, ponieważ większość energii hamowania zostaje rozproszona na ciepło w układzie hamulcowym pojazdu.



Rys. 9. Napęd elektryczny - wartość chwilowa mocy pobieranej i oddawanej do baterii

Na rysunku 9 przedstawiona jest chwilowa moc elektryczna pobierana z akumulatora głównego podczas jazdy, jak również moc oddawana podczas hamowania odzyskowego. Maksymalna moc podczas przyspieszeń oraz podjazdów pod wzniesienia wynosi około 48 kW, a moc hamowania wynosi około 18 kW. Cykl badań z napędem elektrycznym był bardzo podobny do cyklu badań z silnikiem spalinowym, tj. taka sama liczba przystanków z czasem postoju ok. 10 sekund. Nieznaczne różnice w charakterystyce jazdy są spowodowane zmieniającymi się warunkami drogowymi, gdyż na badanej trasie było kilka skrzyżowań ze światłami oraz przejścia dla pieszych.

Na wykresie 10 przedstawiono odzyskaną energię w funkcji czasu (pokonywanych kilometrów). Charakterystycznymi obszarami pracy jest czas jazdy w okolicy 37 i 50 minuty. W tych fragmentach mamy zjeżdżanie z góry, co uwidacznia się w zwiększonej ilości oddawanej energii elektrycznej do akumulatora głównego.



Rys. 10. Napęd elektryczny - energia elektryczna odzyskiwana

W całym badanym 80-minutowym okresie jazdy odzyskano prawie 1.1 kWh energii elektrycznej, co stanowi ponad 5.3 % odzysku energii do całkowitej pojemności akumulatora głównego.

6. Podsumowanie

Wykonano dwie jazdy samochodem hybrydowym symulującym mały autobus miejski. Jedno badanie wykonano z napędem spalinowym, natomiast drugie z napędem elektrycznym. We wszystkich badaniach stosowano hamowanie odzyskowe.

Tabela 3. Porównanie wyników badań:

		Spalinowy	Elektryczny
1	Pokonany dystans [km]	47,26	47,11
2	Maksymalna prędkość [km/h]	72,87	64,87
3	Czas przejazdu [min]	80,77	80,78
4	Średnia prędkość [km/h]	35,11	34,99
5	Pojemność zasobnika energii [kWh]	21,0	21,0
6	Ilość energii zużytej która należy dostarczyć z zewnątrz [kWh]	0,62	-14,81
7	Ilość odzyskanej energii [kWh]	0,92	1,11
8	Procentowy odzysk energii [%]	4,4	5,3
9	Całkowita zużyta energia [kWh]	- 0,31	-15,93
10	Zużycie kWh/100 km	1,31	31,44
11	Zasięg teoretyczny [km]		66,78

W tabeli 3 zestawiono najważniejsze parametry dotyczące przeprowadzonych badań. Można zauważyć, że dużo energii elektrycznej można zaoszczędzić stosując odpowiednią metodę jazdy [1], np. hamując odzyskowo. Taki sposób

jazdy nie tylko zwiększa zasięg samochodu, ale również zmniejsza zużycie mechanicznych elementów hamulca (np. klocki hamulcowe), a także powoduje mniejszą emisję szkodliwych pyłów z układu hamulcowego. Niezależnie od miejsca przeprowadzenia badań widzimy, że średnia prędkość przejazdu wynosi ok. 30-35 km/h, a prędkość maksymalna niewiele przekracza 70 km/h. Jest to istotne z punktu widzenia nowo projektowanych napędów do autobusów miejskich i podmiejskich, a także jego efektywności energetycznej. Napęd elektryczny stosowany w mikrobusach i minibusach do transportu publicznego w obszarze zabudowanym, swoją optymalną (najwyższą) sprawność powinien posiadać właśnie w tych "średnich" prędkościach.

7. Literatura

- [1]. Rossa R.: „Badania eksploatacyjne samochodu osobowego zelektryfikowanego zestawem e-Kit”. „Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe”, nr 2/2014 (102), str. 151-155.
- [2]. Bernatt J.: „Obwody elektryczne i magnetyczne maszyn elektrycznych wzbudzanych magnesami trwałymi”, Wydawnictwo Komel Katowice 2011.
- [3]. Król E., Rossa R.: „Silniki z magnesami trwałymi o dużej przeciążalności momentem”. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, 81/2009.
- [4]. Rossa R., Będkowski B., Bernatt J., Meinicke T.: „Badania eksploatacyjne miejskiego samochodu dostawczego z napędem elektrycznym e-Kit”, Logistyka, nr 6/2014.
- [5]. Król E.: „Badanie efektywności energetycznej pojazdu hybrydowego bimodalnego”, Logistyka, nr 6/2014.
- [6]. Dukalski P., Białas A., Radwański R., Będkowski B., Fręchowicz A.: "Obliczenia trakcyjne samochodu z silnikiem BLDC z przełączalną liczbą zwojów.", Przegląd Elektrotechniczny 11/2013.

Autorzy

Emil Król, INiME KOMEL
 e-mail: e.krol@komel.katowice.pl
 Wojciech Skęczek, Handel i Usługi Wojciech Skęczek
 e-mail: szkotpless@gmail.com