

Analiza pracy źródła zasilania elektrycznego autobusu miejskiego

Marcin Biernacki, Przemysław Majewski

1. Wstęp

Pojazdy elektryczne znane są już od lat trzydziestych XIX w., kiedy to pojawiły się pierwsze tego typu pojazdy. Wówczas, jako źródła zasilania stosowano tzw. ogniwa Volty, co mocno ograniczało moc i zasięg ówczesnych pojazdów o napędzie elektrycznym. Sytuacja zmieniła się ok. roku 1859, kiedy Francuz Gaston Planté opracował pierwszy akumulator kwasowo-ołowiowy. Wówczas nastąpił rozkwit pojazdów elektrycznych trwający aż do początków XX w., kiedy to coraz powszechniej stosowano silnik spalinowy jako źródło napędu pojazdów, co rozwiązywało wiele ograniczeń związanych z napędem elektrycznym.

Choć wiele z tych ograniczeń do dnia dzisiejszego udało się rozwiązać, to jednak nadal w przypadku pojazdów elektrycznych konstruktorzy borykają się z problemem stosunkowo ograniczonego zasięgu, trwałości, pojemności, a także i masy zastosowanych zasobników energii (akumulatorów), jak również z ograniczeniami pracy elektrycznych zasobników energii w niskich temperaturach. Nie bez znaczenia są bardzo wysokie koszty nowoczesnych zasobników energii przeznaczonych do zasilania układów napędowych autobusów.

Niemniej jednak, mimo niedogodności wynikających ze stosowania napędu elektrycznego z własnym źródłem energii, obecnie obserwuje się duże zainteresowanie tego rodzaju napędem, głównie ze względów ekologicznych, gdyż napęd elektryczny wydaje się być czystszy, nie emitującym w miejscu eksploatacji substancji szkodliwych oraz emitującym znacznie mniejszy hałas, co nabiera szczególnie znaczenia w dużych aglomeracjach miejskich, gdzie wady wynikające z zastosowania napędu elektrycznego, a w szczególności elektrycznych zasobników energii z nim

Streszczenie: W pracy wykonano analizę testów drogowych stosowanych między innymi do badań nowo projektowanych układów napędowych autobusów miejskich. Został opracowany własny model trasy testowej autobusu na bazie jednego ze znormalizowanych cykli jazdy autobusu w warunkach miejskich oraz rzeczywistych danych zebranych na podstawie wielokrotnego przejazdu jedną z tras obsługiwanych przez komunikację miejską w jednym z największych miast w Polsce, między przystankami krańcowymi. Przeanalizowano pracę zasobników energii elektrycznej pod kątem wymagań odnośnie do zasięgu pojazdu (według potrzeb zakładu komunikacji miejskiej i uwzględnieniu aktualnych możliwości technicznych), trwałości i masy źródła energii, czasu potrzebnego na naładowanie źródła po cyklu bądź cyklach jazdy. Ze względów ekonomicznych poza obecnie

najczęściej stosowanymi zasobnikami energii typu litowo-jonowego czy litowo-polimerowego, wzięto pod uwagę inne typy źródeł energii, mniej korzystne z punktu widzenia gromadzenia energii (z uwagi na masę). Celem pracy jest określenie charakteru pracy elektrycznego źródła energii oraz opracowanie wytycznych doboru parametrów źródła energii istotnych z punktu widzenia eksploatacji, a także analiza jego trwałości w zależności od założonych parametrów ruchu pojazdu komunikacji zbiorowej (autobusu) w warunkach miejskich. Ponadto praca ma na celu zwrócenie uwagi na inne technologie wykonania zasobników energii, niekiedy znacznie tańsze niż obecnie wykorzystywane, a w odpowiednich warunkach możliwe do zastosowania.

Słowa kluczowe: autobus miejski, akumulator, źródło energii

ANALYSIS OF OPERATE OF THE POWER SUPPLY SOURCE FOR THE CITY BUS

Abstract: The paper involved the analysis of road tests used for the research of newly designed drive systems of city buses. An own model of the bus test route was developed based on one of the standardized bus cycles in urban conditions and real data collected on the basis of multiple journeys by one of the routes, between end stops, served by public transport in one of the largest cities in Poland. The electric energy storages operate have analyzed taking in to account of the vehicle range requirements (according to the needs of the municipal transport plant and taking into account the current technical capabilities), durability and mass of the energy source, time needed to charge the source after the one cycle or driving cycles. For economic reasons, apart from currently the most commonly used lithium-

ion or lithium-polymer type energy storage, other types of energy sources, less beneficial from the point of view of energy accumulating (mass), have been taken into account. The purpose of this paper is to determine of the electric energy source operating regime and develop guidelines for the selection of parameters of the source which are important from the point of view exploitation and analysis of its durability depending on the assumed parameters of the traffic of the public transport vehicle (bus) in urban conditions. In addition, the this paper purpose is to draw attention to other energy storage technologies, sometimes much cheaper than currently used, and in appropriate conditions possible to apply.

Keywords: city bus, battery, power supply source

związanych, są mniej odczuwalne niż podczas pokonywania dużych odległości z dala od miast [1, 4].

2. Podstawy teoretyczne

Celem dokonania analizy pracy źródła zasilania elektrycznego autobusu miejskiego niezbędne jest określenie parametrów ruchu charakterystycznych dla elektrycznego pojazdu komunikacji miejskiej. Należy określić zapotrzebowanie na moc i moment obrotowy silnika podczas cyklu jazdy w ruchu miejskim [2, 4]. W tym celu dokonano uproszczonych obliczeń oporów ruchu pojazdu, na które składają się:

- siła oporu toczenia;
- siła bezwładności;
- siła tarcia wewnętrzznego (np: przekładnie);
- siła oporu aerodynamicznego.

2.1. Bilans sił działających na pojazd

Siłę F_C , niezbędną do ruszenia pojazdu z miejsca, nadania mu odpowiedniego przyspieszenia do osiągnięcia prędkości zadanej, opisuje zależność (1):

$$F_C = F_t + F_{OP} + F_B + F_{OTL} + F_{OPP} \quad (1)$$

Przy czym:

- F_t – siła oporu toczenia opon o nawierzchnię;
- F_{OP} – siła oporu powietrza;

- F_B – siła bezwładności;
- F_{OTL} – siła oporu toczenia łożysk kół jezdnych;
- F_{OPP} – siła oporu przekładni.

Po osiągnięciu prędkości zadanej następuje zmniejszenie zapotrzebowania na moc i moment obrotowy silnika. Wówczas zależność (1) przyjmuje postać:

$$F_C = F_t + F_{OP} + F_{OTL} + F_{OPP} \quad (2)$$

W przypadku poruszania się pojazdu ruchem jednostajnym nie występuje siła bezwładności F_B . Siła F_B występuje w przypadku poruszania się ruchem przyspieszonym podczas rozpędzania oraz ruchem opóźnionym podczas hamowania pojazdu, kiedy to możliwa jest zamiana energii kinetycznej na inny rodzaj energii, która może zostać ponownie wykorzystana np. na rozpędzanie pojazdu [2].

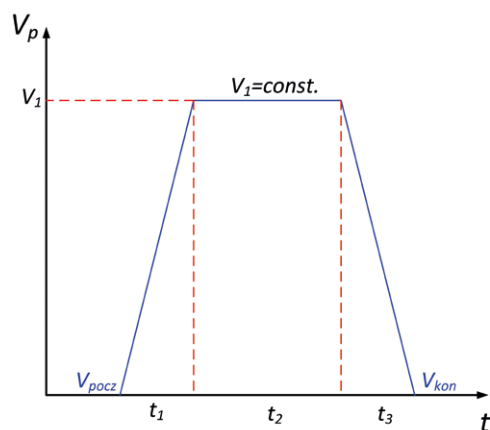
3. Cykl jazdy

Obecnie wykorzystywanych jest wiele modeli cyklu poruszania się autobusu w warunkach miejskich. Na ich podstawie można wyznaczyć teoretyczne zapotrzebowanie przez pojazd na moc, moment obrotowy i energię. Podstawowe fazy cyklu jazdy składają się z [5]:

- ruszania z miejsca;
- przyspieszania;

reklama

reklama



Rys. 1. Podstawowy cykl jazdy pojazdu składający się z trzech faz

- ruchu ze stałą prędkością;
- hamowania.

Podstawowy cykl jazdy, składający się z przyspieszenia w czasie t_1 , ruchu z prędkością ustaloną w czasie t_2 oraz hamowania w czasie t_3 , został przedstawiony na rys. 1.

3.1. Znormalizowane cykle jazdy

W większości przypadków do testowania nowych czy też modernizowanych konstrukcji autobusów miejskich stosuje się znormalizowane modele ruchu tych pojazdów. W większości przypadków testy te powstały w europejskich oraz amerykańskich (Stany Zjednoczone Ameryki Północnej) ośrodkach badawczych, a ich budowa ma możliwe najwierniej odzwierciedlać rzeczywiste warunki ruchu autobusu w warunkach największych miast Europy i USA [5]. Najpopularniejsze z testów to:

- Braunschweig Cycle;
- BP Bus Cycle;
- Helsinki Drive Cycle;
- New York Bus Cycle;
- Manhattan Bus Cycle;
- County Transit Authority Cycle (OCTA);
- SORT (*Standardised On-Road Test*).

3.2. Cykle jezdne SORT (Standardised On-Road Test)

Cechą charakterystyczną testów SORT jest ich budowa modułowa, pozwalająca z wielu testów podstawowych zbudować

Tabela 1. Podstawowe parametry ruchu dla testów SORT

	SORT 1	SORT 2	SORT 3
Prędkość średnia [km/godz]	12,1	18,0	25,3
Udział postoju w teście [%]	39,7	33,4	0,1
Prędkość stała w profilu 1 [km/godz/m]	20/100	20/100	30/200
Przyspieszenie w profilu 1 [m/s ²]	1,03	1,03	0,77
Prędkość stała w profilu 2 [km/godz/m]	20/200	40/220	50/600
Przyspieszenie w profilu 2 [m/s ²]	0,77	0,62	0,57
Prędkość stała w profilu 3 [km/godz/m]	40/220	50/600	60/650
Przyspieszenie w profilu 3 [m/s ²]	0,62	0,57	0,46
Droga pokonywana w teście [m]	520	920	1450
Opóźnienie w profilach prędkości [m/s ²]	0,8	0,8	0,8

jeden test złożony z wielu cykli jazdy, które poprzez odpowiednie zestawienie poszczególnych modułów pozwala z dużą dokładnością odzwierciedlić warunki ruchu pojazdu w danym mieście. W związku z powyższym ten typ testów został wybrany do tworzenia modelu ruchu autobusu miejskiego odpowiadającego jednej z tras miejskiej komunikacji zbiorowej w Warszawie. Na potrzeby modelowania ruchu autobusu autorzy wybrali test typu SORT 2 [5], z uwzględnieniem rzeczywistych parametrów przejazdu trasą testową między przystankami krańcowymi.

4. Zapotrzebowanie na moc, moment obrotowy i energię

Ruch autobusów miejskich można podzielić na cztery fazy. Analogiczne fazy ruchu występują w przypadku każdego pojazdu, jednak w pojazdach komunikacji miejskiej, takich jak autobusy, wszystkie podstawowe fazy ruchu występują ze zwiększoną częstotliwością, wynikającą między innymi z potrzeby częstego zatrzymywania się na przystankach pasażerskich.

Ruszanie z miejsca rozumiane jest jako przyspieszenie od prędkości „zerowej” do 5% prędkości maksymalnej pojazdu, hamowanie może wynikać z potrzeby zatrzymania na przystanku pasażerskim lub z uwarunkowań drogowych.

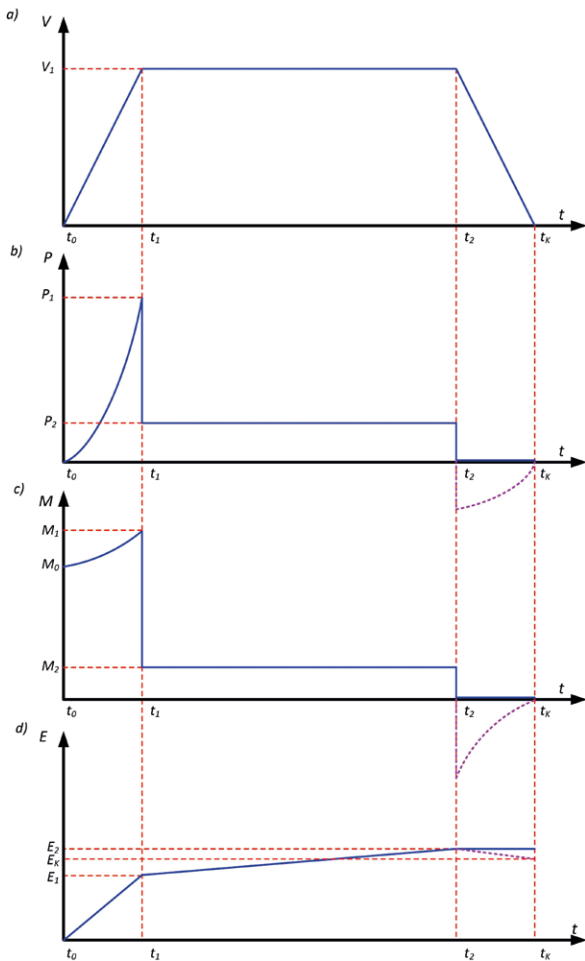
Na potrzeby ruszenia z miejsca pojazdu istnieje przede wszystkim potrzeba wytworzenia odpowiedniego momentu obrotowego, moc przekazywana na kołach jezdnych napędzanych w tym przypadku wynosi ok. „zero”. Uproszczone przebiegi zapotrzebowania na moc, moment obrotowy i energię przedstawia rys. 2. Linia przerywaną purpurową zaznaczono przebiegi zapotrzebowania na moc, moment obrotowy i energię w przypadku układu napędowego z układem odzyskiwania energii podczas hamowania i wspomaganie głównego akumulatora w stanach zwiększonego zapotrzebowania na energię [3].

5. Badania symulacyjne

Do badań symulacyjnych wykorzystano dwa modele układu napędowego przeznaczonego do zastosowania w autobusach miejskich. Poddano analizie układ napędowy bez możliwości odzyskiwania energii podczas hamowania oraz układ z możliwością rekuperacji energii podczas hamowania. Schematy tych układów przedstawiono na rys. 3 i 4.

W przypadku układu napędowego z możliwością odzyskiwania energii przyjęto, że akumulator nie będzie jedynym źródłem zasilania układu napędowego pojazdu, a będzie wspomagany dodatkowym (pomocniczym) zasobnikiem energii, w tym przypadku typu superkondensatorowego. Zastosowanie pomocniczego zasobnika energii może pozwolić na bardziej stabilną pracę głównego magazynu energii (akumulatora), jak również odciążenie go w stanach dynamicznych (przyspieszenie pojazdu), a więc najczęściej związanych ze zwiększonym zapotrzebowaniem na energię bądź potrzebą przekazania dużej ilości energii w krótkim czasie, np. podczas hamowania. Należy zwrócić uwagę, że superkondensator ma najczęściej zdecydowanie większe możliwości przyjmowania dużych ilości energii w krótkim okresie czasu [3].

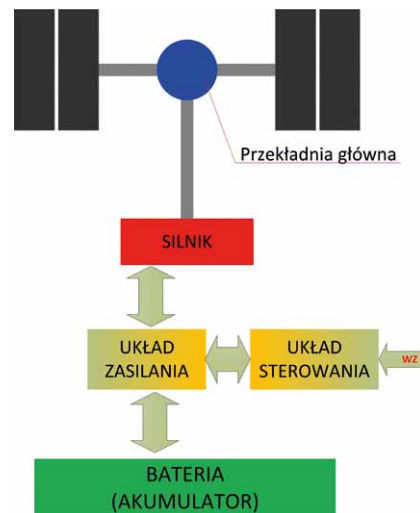
Badania symulacyjne przeprowadzono dla różnych typów magazynów energii od najtańszych technologii wykonania akumulatorów do jednych z najdroższych obecnie stosowanych



Rys. 2. Podstawowy cykl ruchu pojazdu: a) przebieg prędkości pojazdu; b) zapotrzebowanie na moc silnika; c) zapotrzebowanie na moment obrotowy silnika; d) energia zużyta podczas cyklu jazdy

Tabela 2. Podstawowe parametry techniczno-ruchowe pojazdu

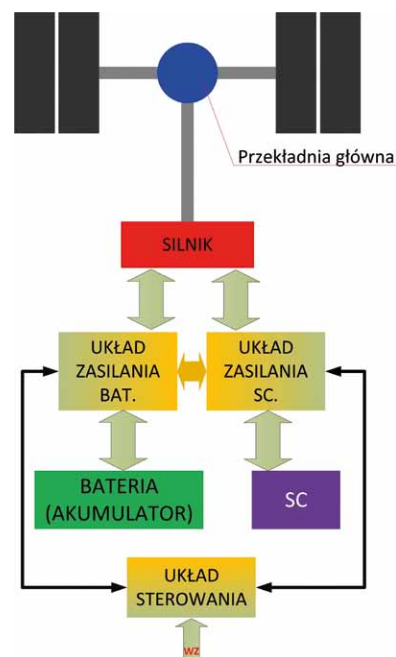
Powierzchnia czynna pojazdu	7,8 [m ²]
Współczynnik oporu powietrza	1,5
Masa pojazdu bez akumulatorów	14 000 [kg]
Ilość kół pojazdu	10
Promień koła	0,4 [m]
Prędkość maksymalna w ruchu miejskim	50 [km/godz]
Przyspieszenie	≤ 1 [m/s ²]
Przełożenie przekładni głównej	7
Maksymalna ilość przewożonych osób	176
Współczynnik oporu toczenia kół jezdnych w zależności od ciśnienia w ogumieniu	0,015
Współczynnik oporu toczenia kół jezdnych w zależności od rodzaju podłoża	3
Gęstość powietrza	1,293 kg/m ³
Współczynnik tarcia łożyska piasty koła	0,0035



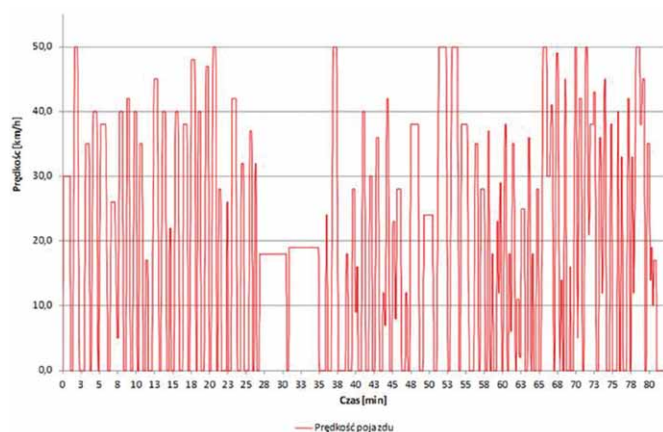
Rys. 3. Uproszczony schemat blokowy układu napędowego pojazdu elektrycznego zasilanego tylko z akumulatora; WZ – wartość zadana (wartość zadana prędkości)

akumulatorów wykonanych w technologii litowo-polimerowej, co pozwala na sformułowanie wniosków odnośnie do ich przydatności bądź nie w konkretnych zastosowaniach, uwzględniając koszt zakupu poszczególnych typów akumulatorów. Do rozważań przyjęto przejazd autobusu z akumulatorami wystarczającymi na pojedynczy przejazd autobusu trasą testową o długości 26 km oraz z akumulatorami wystarczającymi na wielokrotny przejazd (bez ładowania akumulatorów) na trasie testowej 26 km na dystansie ok. 350 km. Dystans 350 km bez konieczności ładowania akumulatorów wynika z potrzeb zakładu komunikacji miejskiej. Autobus poruszał się według przebiegu zmian prędkości jak na rys. 5.

Głównym czynnikiem wpływającym na zapotrzebowanie na moc i moment obrotowy, a więc i na energię, przez silnik napędowy jest między innymi konieczność przewożenia akumulatorów, które mogą stanowić bardzo znaczące obciążenie pojazdu (autobusu). W tabeli 3 przedstawiono szacunkowe (na podstawie badań symulacyjnych) zestawienie maksymalnych wartości zapotrzebowania na moc i moment obrotowy silnika w zależności od rodzaju zastosowanego (przewożonego) akumulatora (jego masy), przy założeniu parametrów techniczno-ruchowych autobusu jak w tabeli 2.



Rys. 4. Uproszczony schemat blokowy układu napędowego pojazdu elektrycznego zasilanego z akumulatora oraz z układu pomocniczego ze źródłem energii w postaci superkondensatora – SC; WZ – wartość zadana (wartość zadana prędkości)



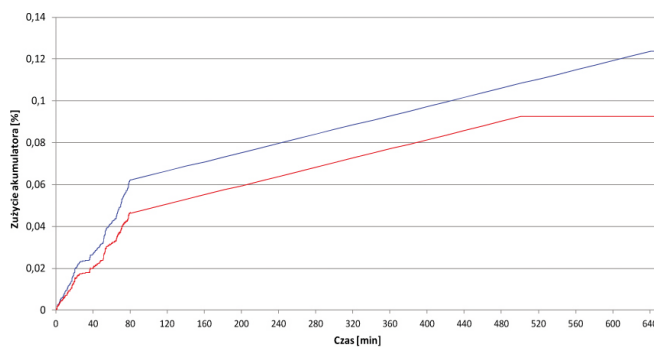
Rys. 5. Przebieg zmian prędkości autobusu na jednej z warszawskich tras komunikacji miejskiej

Na podstawie przyjętej gęstości energii (Wh/kg), jaką można zgromadzić w akumulatorze wykonanym w danej technologii, możliwe było oszacowanie, jak dużą masę akumulatorów należy przewozić, aby zapewnić ruch pojazdu zgodnie z założeniami na przyjętej trasie testowej. W tabelicy 4 zestawiono masy i zapotrzebowanie na energię akumulatora na pokonanie trasy testowej, przy założeniu pojedynczego przejazdu oraz wielokrotnego przejazdu trasą testową na dystansie 350 km bez konieczności ładowania akumulatorów.

Na trwałość źródła energii (akumulatora) ma wpływ wiele czynników, między innymi technologia wykonania, z którą związana jest liczba cykli pracy akumulatora. Od pojemności zastosowanego zasobnika energii będzie też zależeć jego trwałość, która w tym przypadku będzie związana z ilością cykli pracy akumulatora np. na pojedynczy przejazd pojazdu (autobusu) trasą testową. Istotnym elementem, który może znacząco zwiększyć trwałość zastosowanego źródła energii jest zastosowanie dodatkowego (pomocniczego) źródła energii,

Tabela 3. Zestawienie maksymalnych wartości zapotrzebowania na moc i moment obrotowy silnika napędowego

Rodzaj akumulatora	Cykl jazdy 26 km między przystankami krańcowymi (na przyjętej trasie testowej)		Cykl jazdy 350 km, bez konieczności ładowania akumulatorów	
	Moc [kW]	Moment obrotowy [Nm]	Moc [kW]	Moment obrotowy [Nm]
Ołowiowy (Pb)	300	1372	1352	6488
Ołowiowy bezobsługowy (Pb)	292	1336	628	2931
Niklowo-kadmowy (NiCd)	289	1325	531	2462
Niklowo-wodorokowy (NiHM)	288	1317	476	2199
Sodowo-siarkowy (NaS)	282	1293	349	1598
Niklowo-cynkowy (NiZn)	289	1325	531	2462
Litowo-jonowy (Li-Ion)	285	1303	396	1815
Litowo-polimerowy (LiPo)	282	1290	337	1543



Rys. 6. Przykład przyrostu zużycia akumulatora pracującego na potrzeby zasilania układu bez możliwości (linia niebieska) i z możliwością (linia czerwona) odzyskiwania energii przy wspomaganium pomocniczym zasobnikiem energii w dynamicznych stanach jazdy autobusu

odciążającego zasobnik główny między innymi w stanach zwiększonego zapotrzebowania na energię. Do obliczeń przyjęto pomocnicze źródło zasilania typu superkondensatorowego. Źródła tego typu charakteryzują się znacznie większą trwałością (np. 1 500 000 cykli pracy) oraz znacznie lepszą zdolnością przyjmowania dużych ilości energii w krótkim czasie w porównaniu do akumulatorów, co może mieć istotne znaczenie dla potrzeb odzyskiwania energii podczas hamowania. Szacuje się, że odzyskiwanie energii podczas hamowania autobusu miejskiego pozwala odzyskać nawet do 30% energii zużytej na ruch pojazdu oraz jednocześnie, jeśli energia ta będzie gromadzona i w stosownym czasie oddawana przez pomocnicze źródło energii, można znacznie obniżyć zużycie głównego magazynu

Tabela 4. Zestawienie masy i energii zgromadzonej w akumulatorze w zależności od technologii wykonania akumulatora i założonego przebiegu pojazdu w warunkach miejskich

Rodzaj akumulatora	Gęstość energii [Wh/kg]	Droga 26km		Droga 350 km	
		Masa akumulatora [kg]	Energia zgromadzona w akumulatorze* [MJ]	Masa akumulatora [kg]	Energia zgromadzona w akumulatorze* [MJ]
Ołowiowy (Pb)	33	1265	150	62181	7387
Ołowiowy bezobsługowy (Pb)	50	806	145	20304	3654
Niklowo-kadmowy (NiCd)	60	672	145	14640	3162
Niklowo-wodorokowy (NiHM)	70	576	145	11477	2892
Sodowo-siarkowy (NaS)	150	264	142	4128	2229
Niklowo-cynkowy (NiZn)	60	672	145	14640	3162
Litowo-jonowy (Li-Ion)	100	396	142	6840	2462
Litowo-polimerowy (LiPo)	175	226	142	3435	2164

* Pojemność akumulatora została dobrana w sposób zapewniający zgromadzenie energii w ilości wystarczającej do przebycia przyjętej trasy testowej bez konieczności doładowania akumulatorów

Tabela 5. Zestawienie porównania zużycia akumulatora

Rodzaj akumulatora	Droga 26 km			Droga 350 km		
	Minimalna pojemność akumulatora	Zużycie akumulatora		Minimalna pojemność akumulatora	Zużycie akumulatora	
		[kWh]	[%] ¹		[%] ²	[kWh]
Ołowiowy (Pb)	42	0,24	0,17	2052	0,0130	0,0101
Ołowiowy bezobsługowy (Pb)	40	0,12	0,09	1008	0,0088	0,0052
Niklowo-kadmowy (NiCd)	40	0,05	0,04	878	0,0036	0,0021
Niklowo-wodorkowy (NiHM)	40	0,13	0,09	742	0,0094	0,0056
Sodowo-siarkowy (NaS)	40	0,22	0,16	619	0,0155	0,0096
Niklowo-cynkowy (NiZn)	40	0,21	0,16	878	0,00146	0,0088
Litowo-jonowy (Li-Ion)	40	0,12	0,09	684	0,0086	0,0053
Litowo-polimerowy (LiPo)	40	0,65	0,48	601	0,0457	0,0285

¹ bez układu odzyskiwania energii podczas hamowania i wspomagania w stanach zwiększonego zapotrzebowania na energię;
² z ww. układem.

energii. Na rys. 6 przedstawiono przykład zmian zużycia głównego zasobnika energii jako jedyne źródła zasilania w układzie napędowym autobusu elektrycznego (linia niebieska) oraz w układzie wyposażonym w pomocnicze źródło energii (linia czerwona), przy zachowaniu tych samych parametrów głównego źródła zasilania, na potrzeby pojedynczego przejazdu testową trasą komunikacji miejskiej.

Przykład przedstawiony na rys. 6 obejmuje pojedynczy przejazd autobusu na trasie testowej, przy założeniu pojemności głównego zasobnika energii wystarczającej na jednokrotny przejazd między przystankami krańcowymi. Cykl obejmuje maksymalne dopuszczalne rozładowanie akumulatora na potrzeby pokonania całej trasy testowej w czasie ok. 80 min i pełne „wolne” ładowanie akumulatora.

W tabeli 5 przedstawiono przewidywaną trwałość akumulatora (głównego zasobnika energii) w zależności od technologii wykonania i jego pojemności (masy) umożliwiającej ruch autobusu na trasie testowej zgodnie z wymaganiami.

6. Wnioski

Główne źródło energii powinno mieć zdolność oddawania mocy ciągłej na pokrycie zapotrzebowania na moc w ustalonym stanie jazdy, jak również w stanach dynamicznych, kiedy zapotrzebowanie na moc chwilową może być wielokrotnie większe niż w ustalonym stanie ruchu pojazdu.

Główne źródło energii powinno być przystosowane do przyjmowania dużych ilości energii w krótkim czasie, gdyż taka potrzeba może się pojawić podczas hamowania odzyskowego, przy czym istotny jest „zapas pojemności” głównego zasobnika energii przewidziany na energię odzyskaną. Jednak nie zawsze parametry głównego źródła energii pozwalają na przyjęcie dużej ilości energii w krótkim czasie, korzystne zatem wydaje się zastosowanie dodatkowego (pomocniczego) zasobnika

energii, np. typu superkondensatorowego, który charakteryzuje się znacznie większymi możliwościami w zakresie dwukierunkowego przepływu dużej ilości energii w krótkim czasie, w porównaniu do zasobników akumulatorowych.

Układ odzyskiwania energii może pracować jako retarder, pozwalając w sposób kontrolowany zmniejszyć prędkość pojazdu, przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia elementów ciernych układu hamulcowego oraz minimalizując ryzyko uszkodzenia układu hamulcowego wskutek przegrzania (długie zjazdy ze wzniesienia, częste intensywne hamowanie).


Zastosowanie dodatkowego układu odzyskiwania energii podczas hamowania i wspomagającego układ napędowy pojazdu w stanach zwiększonego zapotrzebowania na energię oraz współpracującego z dodatkowym (pomocniczym) zasobnikiem energii pozwala między innymi zmniejszyć wymagania odnośnie do zdolności oddawania mocy przez główny zasobnik energii. Wówczas główne źródło zasilania pokrywa zapotrzebowanie na energię od „zera” do stanu ruchu ustalonego, a zwiększone zapotrzebowanie na energię (np. na przyspieszanie autobusu) jest pokrywane z magazynu pomocniczego, np. superkondensatora.

Zastosowanie układu odzyskiwania energii, np. z zastosowaniem superkondensatora jako magazynu energii, pozwala na zmniejszenie zużycia głównego zasobnika energii (akumulatora) nawet o około 30% w stosunku do tego samego akumulatora pracującego bez układu odzyskiwania i wspomagania układu napędowego w stanach dynamicznych, ponadto pozwala zmniejszyć wymagania co do zdolności oddawania mocy oraz pojemności głównego zasobnika energii, co może zmniejszyć koszt zakupu samego głównego zasobnika energii.

W przypadku dużych i ciężkich pojazdów (o DMC kilkanaście tys. kilogramów) przewożenie cięższych, ale wykonanych w tańszej technologii akumulatorów może mieć ekonomiczne uzasadnienie, w szczególności, jeśli będą one dobierane pod konkretną trasę (stosunkowo krótką, np. z możliwością ich szybkiej wymiany na naładowane na przystankach krańcowych). Jeżeli przewiduje się pokonywanie dłuższych tras (np. 350 km) bez możliwości ładowania akumulatorów, pod uwagę obecnie można brać jedynie akumulatory wykonane w technologii litowo-jonowej lub litowo-polimerowej.

Literatura

- [1] FIC B.: *Pojazdy elektryczne*. Wydawnictwo i Handel Książkami, Krosno 2012.
- [2] GLINKA T., FICE M., SETLAK R.: *Hybrydowy napęd pojazdu miejskiego*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 75/2006.
- [3] High energy density with ultracapacitors. Bursting with power, Siemens Matsushita Components, 2009.
- [4] MERKISZ J., PIELECHA I.: *Alternatywne napędy pojazdów*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2006.
- [5] UIPUITP Project Standardised On-Road Tests Cycles, Brussels 2010.

 Marcin Biernacki, Przemysław Majewski
Instytut Energetyki Instytut Badawczy, Warszawa