

Wpływ cyklu ruchu elektrycznego autobusu komunikacji miejskiej na pracę akumulatora zasilającego

The impact of a public transport electric bus traffic cycle on the operation of a supply battery

Pojazdy elektryczne znane są już od lat trzydziestych XIX w. Ówczesne źródła zasilania, tzw. ogniwa Volty, znacznie ograniczały moc i zasięg pojazdów o napędzie elektrycznym. Sytuację zmienił, opracowany ok. roku 1859 przez Francuza Gastona Planté, akumulator kwasowo-ołowiowy. Wówczas nastąpił rozkwit pojazdów elektrycznych, trwający aż do początku XX w., kiedy to coraz większą popularność zdobywał silnik spalinowy jako źródło napędu pojazdów – co rozwiązywało wiele ograniczeń związanych z napędem elektrycznym. Chociaż wiele z nich do dnia dzisiejszego udało się rozwiązać, to jednak nadal, w przypadku pojazdów elektrycznych, występują problemy stosunkowo ograniczonego zasięgu, trwałości, pojemności, a zarazem i masy zastosowanych zasobników energii (akumulatorów), jak również ograniczenia pracy elektrycznych zasobników energii w niskich temperaturach.

Istotne znaczenie mają bardzo wysokie koszty nowoczesnych zasobników energii przeznaczonych do zasilania układów napędowych pojazdów, w szczególności 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.

Napęd elektryczny wydaje się czystszy, nieemitujący w miejscu eksploatacji substancji szkodliwych oraz emitujący znacznie mniejszy hałas, co nabiera szczególnego znaczenia w dużych aglomeracjach miejskich, gdzie wady wynikające z zastosowania napędu elektrycznego, a w szczególności elektrycznych zasobników energii z nim związanych, są mniej odczuwalne niż podczas pokonywania dużych odległości z dala od miast [1, 4].

Podstawowe opory ruchu pojazdu

W celu 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:

- siłę oporu toczenia,
- siłę bezwładności,
- siłę tarcia wewnętrznego (np. przekładnie),
- siłę oporu aerodynamicznego.

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):

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

gdzie:

- F_t – siła oporu toczenia opon o nawierzchnię,
- F_{OP} – siła oporu powietrza,
- F_B – siła bezwładności,
- $F_{OT\dot{L}}$ – siła oporu toczenia łożysk kół jezdnych,
- F_{OPP} – siła oporu przekładni.

Można przyjąć, że w chwili ruszania z miejsca siła oporu powietrza F_{OP} ma wartość „zero” i nie odgrywa istotnej roli przy niewielkich prędkościach, jednak w miarę rozpędzania pojazdu nabiera coraz większego znaczenia rosnąc wraz z kwadratem prędkości.

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

$$F_C = F_t + F_{OP} + F_{OT\dot{L}} + F_{OPP} \quad (2)$$

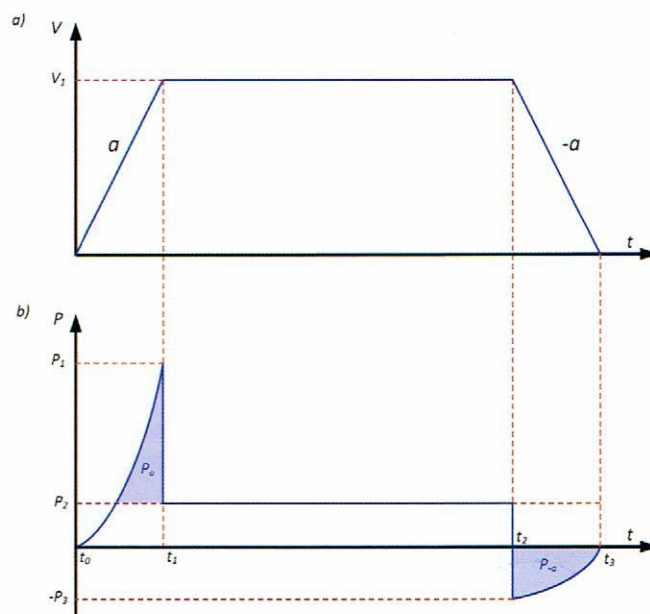
Siła bezwładności F_B nie występuje w przypadku poruszania się pojazdu ruchem jednostajnym a może osiągać znaczne wartości w przypadku poruszania się pojazdu (autobusu) ruchem przyspieszonym podczas rozpędzania oraz ruchem opóźnionym podczas hamowania, kiedy to możliwa jest zamiana energii kinetycznej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

Ruch pojazdu

Obecnie wykorzystywanych jest wiele modeli cykli 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,
- 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 rysunku 1a, a na rysunku 1b przedstawiono odpowiadające mu zapotrzebowanie na moc P .



Rys. 1.

- a) podstawowy cykl jazdy pojazdu składający się z trzech faz,
- b) zmiany zapotrzebowanie na moc w podstawowym cyklu jazdy

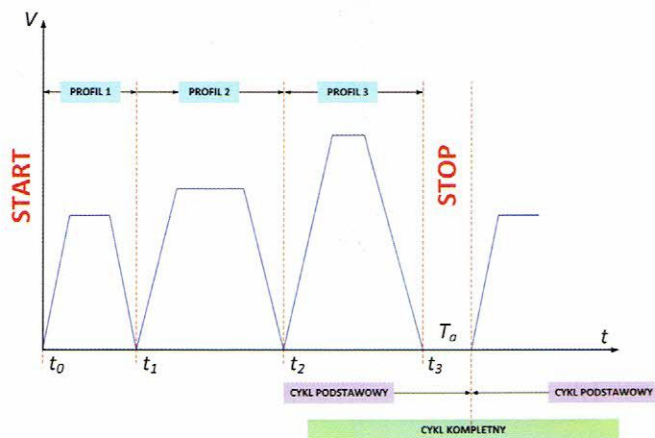
Znormalizowane cykle ruchu pojazdu

Do testowania nowych czy też modernizowanych konstrukcji autobusów miejskich często 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).

Znormalizowany cykl jazdy „SORT (Standardised On-Road Test)”

Testy SORT charakteryzują się budową modułową, pozwalającą z wielu testów podstawowych zbudować jeden test złożony z wielu cykli jazdy, który poprzez odpowiednie zestawienie poszczególnych modułów pozwala z dużą dokładnością odzwierciedlić warunki ruchu pojazdu w danym mieście. Na rysunku 2 przedstawiono kompletny cykl jazdy SORT, pozwalający na odzwierciedlenie różnych warunków ruchu na obszarach aglomeracji miejskich.



Rys. 2. Przebieg kompletnego cyklu jezdnego SORT dla trzech profili ruchu pojazdu

W związku z powyższym ten typ testów został wybrany do tworzenia modelu ruchu autobusu miejskiego odpowiadającego jednej z tras miejskiej komunikacji zbiorowej. Na potrzeby modelowania ruchu autobusu autorzy wybrali test typu SORT 2 [5], z uwzględnieniem rzeczywistych parametrów przejazdu trasą testową między przystankami krańcowymi.

Tabela 1

Podstawowe parametry ruchu dla testów SORT

	SORT		
	Profil 1	Profil 2	Profil 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 teście, m	520	920	1450
Opóźnienie w profilach prędkości, m/s ²	0,8	0,8	0,8

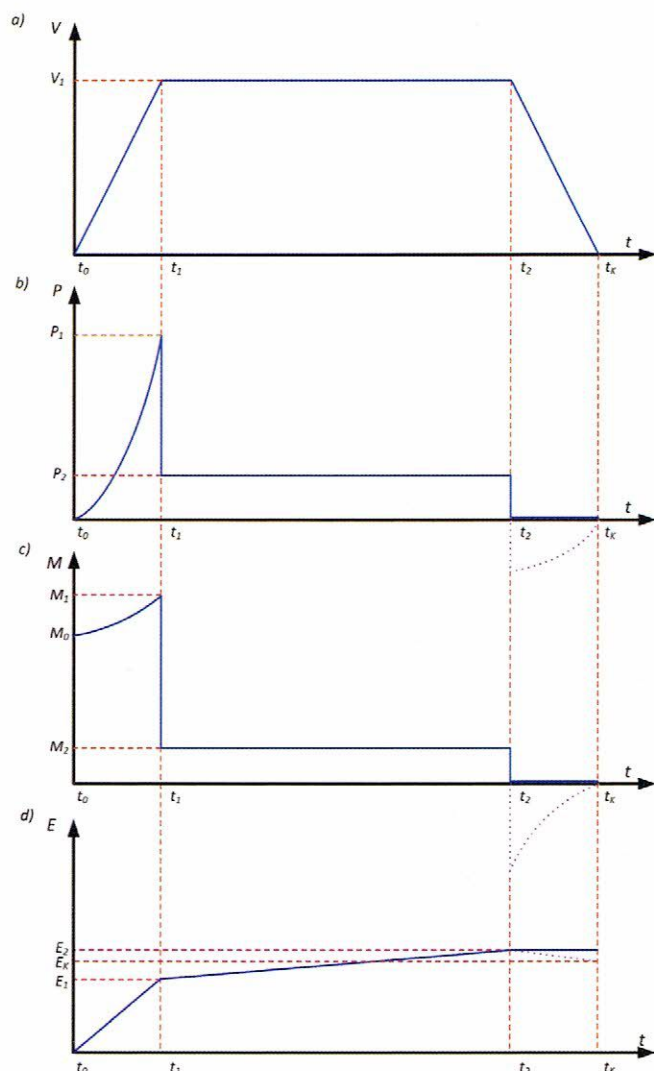
Zapotrzebowanie na moc, moment obrotowy i energię

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 rysunek 3. Linią przerywaną purpurową zaznaczono przebiegi zapo-

trzebowania na moc, moment obrotowy i energię w przypadku układu napędowego z układem odzyskiwania energii podczas hamowania i wspomagania głównego akumulatora w stanach zwiększonego zapotrzebowania na energię [3].



Rys. 3. 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

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 rysunkach 4 i 5.

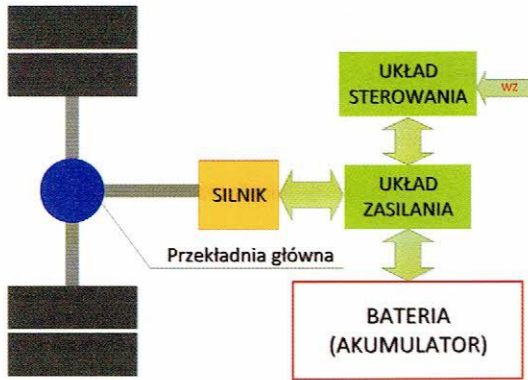
W przypadku układu napędowego z możliwością odzyskiwania energii założono, że akumulator będzie wspomagany pomocniczym zasobnikiem energii na potrzeby zasilania układu napędowego pojazdu. Przyjęto zastosowanie pomocniczego zasobnika energii typu superkondensatorowego. Dodatkowy zasobnik energii może pozwolić na bardziej stabilną pracę głów-

nego 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.

Tabela 2

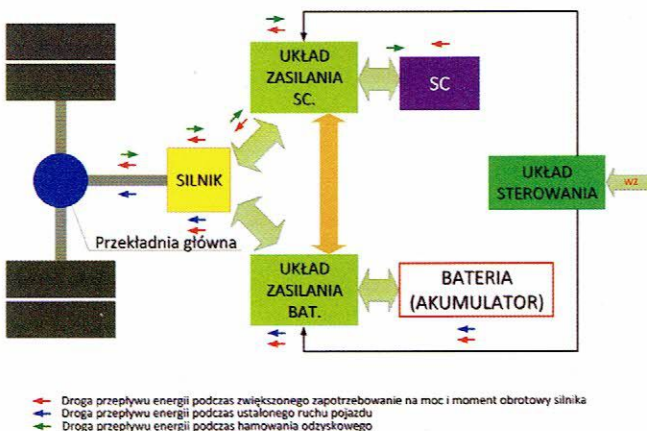
Podstawowe parametry techniczno-ruchowe pojazdu

Powierzchnia czynna pojazdu	7,8 m ²
Współczynnik oporu powietrza	1,5
Masa pojazdu bez akumulatorów	14000 kg
Liczba 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 liczba 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. 4. Uproszczony schemat blokowy układu napędowego pojazdu elektrycznego zasilanego tylko z akumulatora

WZ – wartość zadana (wartość zadana prędkości)



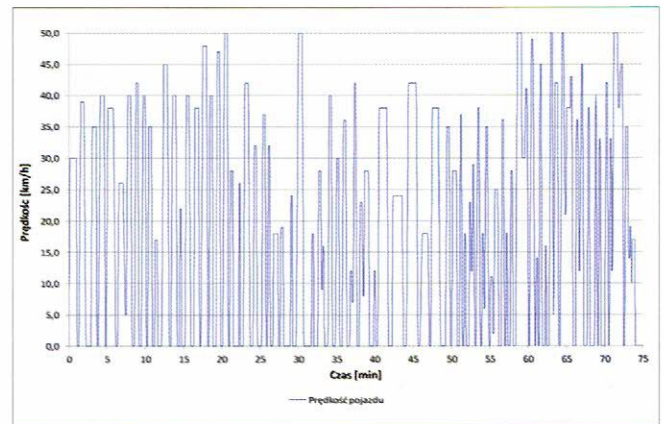
— Droga przepływu energii podczas zwiększonego zapotrzebowania na moc i moment obrotowy silnika
 — Droga przepływu energii podczas ustalonego ruchu pojazdu
 — Droga przepływu energii podczas hamowania odzyskowego

Rys. 5. Uproszczony schemat blokowy układu napędowego pojazdu elektrycznego zasilanego z akumulatora oraz układu z pomocniczego ze źródłem energii w postaci superkondensatora – SC

WZ – wartość zadana (wartość zadana prędkości)

Należy zwrócić uwagę, że superkondensatory, w porównaniu z akumulatorami, charakteryzują się zdecydowanie większymi możliwościami przyjmowania i oddawania dużych ilości energii w krótkim okresie [3]. Badania symulacyjne przeprowadzono dla różnych typów magazynów energii, od najtańszych technologii wykonania akumulatorów do jednych z najdroższych obecnie stosowanych 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 rysunku 6.



Rys. 6. Przebieg zmian prędkości autobusu na jednej z tras komunikacji miejskiej

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.

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 tabeli 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.

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 bezobstugowy (Pb)	292	1336	628	2931
Niklowo-kadmowy (NiCd)	289	1325	531	2462
Niklowo-wodorkowy (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

Od pojemności zastosowanego zasobnika energii będzie też zależeć jego trwałość, która w tym przypadku będzie związana z liczbą cykli pracy akumulatora na np. pojedynczy przejazd pojazdu (autobusu) trasą testową. Istotnym elementem, który może znacząco zwiększyć trwałość zastosowanego źródła energii jest zastosowanie dodatkowego (pomocniczego) źródła energii 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 z akumulatorami, 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, to można znacznie obniżyć zużycie głównego magazynu energii.

Na rysunku 7 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 rysunku 7 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.

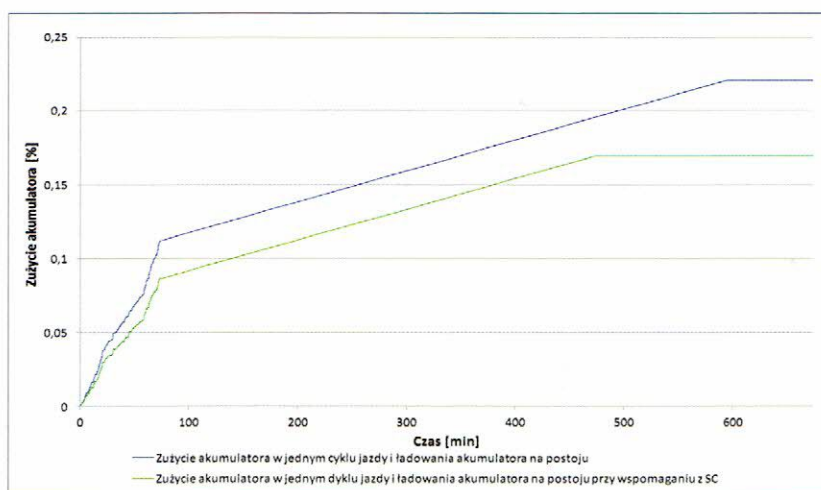
Tabela 4

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

Rodzaj akumulatora	Oznaczenie	Gęstość energii, Wh/kg	Droga 26 km		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 bezobstugowy	Pb	50	806	145	20304	3654
Niklowo-kadmowy	NiCd	60	672	145	14640	3162
Niklowo-wodorkowy	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.

Rys. 7.
Przykład przyrostu zużycia akumulatora pracującego na potrzeby zasilania układu bez możliwości (linia niebieska) i z możliwością (linia zielona) odzyskiwania energii przy wspomaganie pomocniczym zasobnikiem energii w dynamicznych stanach jazdy autobusu



Zestawienie porównania zużycia akumulatora

Rodzaj akumulatora	Droga 26 km			Droga 350 km		
	Minimalna pojemność akumulatora, kWh	Zużycie akumulatora, %		Minimalna pojemność akumulatora, kWh	Zużycie akumulatora, %	
		1)	2)		1)	2)
Ołowiowy (Pb)	42	0,24	0,17	2052	0,0130	0,0101
Ołowiowy bezobslugowy (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 wspomaganie w stanach zwiększonego zapotrzebowania na energię.

²⁾ z ww. układem.

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.

Wnioski

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 istotnym jest „zapas pojemności” głównego zasobnika energii, przewidziany na energię odzyskaną. Jednak nie zawsze parametry głównego źródła energii pozwalają na przyjęcie i zmagazynowanie dużej ilości energii w krótkim czasie; korzystnie jest zatem zastosować dodatkowy zasobnik energii, np. typu superkondensatorowego, który charakteryzuje się znacznie większymi możliwościami w zakresie dwukierunkowego przepływu dużej ilości energii w krótkim czasie, w porównaniu z zasobnikami akumulatorowymi.

Podstawowe 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.

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 w wyniku 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 i współpracującego z dodatkowym (pomocniczym) zasobnikiem energii pozwala między innymi zmniejszyć wymagania dotyczące 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. wykorzystującego superkondensator jako magazyn energii, pozwala na zmniejszenie zużycia głównego zasobnika energii (akumulatora) nawet o około 30% w stosunku tego samego akumulatora pracującego bez układu odzyskiwania i wspomaganie układu napędowego w stanach dynamicznych. Ponadto pozwala zmniejszyć wymagania co do zdolności oddawania mocy oraz pojemności głównego zasobnika energii, co może obniżyć koszt zakupu głównego źródła energii.

W przypadku dużych i ciężkich pojazdów, o DMC (dopuszczalna masa całkowita) wynoszącej kilkanaście czy nawet kilkadziesiąt tysięcy 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 naładowanie na przystankach krańcowych). Jeżeli przewiduje się pokonywanie dłuższych tras bez możliwości ładowania akumulatorów, pod uwagę obecnie można brać jedynie akumulatory wykonane w technologii litowo-jonowej lub litowo-polimerowej.

PIŚMIENICTWO

- [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” 2006, nr 75, 95, Politechnika Śląska.
- [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.

