

Analiza możliwości rekuperacji elektrycznego pojazdu komunikacji miejskiej

Marcin Biernacki, Przemysław Majewski

1. Wstęp

Już w pierwszej połowie XIX wieku pojawiły się na drogach pierwsze pojazdy elektryczne. Mimo iż parametry techniczne ówczesnych źródeł zasilania znacznie ograniczały możliwości przemieszczania się tego rodzaju środków transportu, to panowało przekonanie, że to właśnie ten rodzaj napędu już wkrótce będzie dominował. Przyspieszenie rozwoju pojazdów elektrycznych nastąpiło wraz z wynalezieniem przez Francuza Gastona Planté w roku 1859 akumulatora kwasowo-ołowiowego. Skupiano się wówczas na poprawie osiągnięć i poprawie parametrów jezdnych, co już w roku 1899 pozwoliło na przekroczenie pojazdem elektrycznym magicznej wówczas bariery 100 km/godz. Niemniej jednak głównym problemem był niedostateczny zasięg, związany między innymi z pojemnością i masą stosowanych elektrochemicznych źródeł energii. Nie zwracano wówczas szczególnej uwagi na odzyskiwanie energii podczas hamowania pojazdu elektrycznego, a napęd elektryczny w transporcie drogowym stracił na znaczeniu na rzecz napędu silnikiem spalinowym. Dopiero znaczny postęp, jaki dokonał się wraz z pojawieniem się nowych elektrochemicznych źródeł energii elektrycznej (znacznie lżejszych i o dużej pojemności w stosunku do swojej masy), pozwolił na powrót do elektrycznych pojazdów drogowych na dużą skalę, a możliwość odzyskiwania energii jest niejako integralną częścią nowoczesnego elektrycznego układu napędowego nie tylko w pojazdach elektrycznych, ale i w różnego typu napędach wykorzystujących energię elektryczną. Szczególnego znaczenia zwłaszcza w transporcie drogowym w warunkach górskich czy dużych aglomeracjach miejskich nabiera możliwość odzyskiwania energii podczas hamowania – rekuperacja. Oczywiście należy wspomnieć, że istnieją też inne niż elektryczne sposoby odzyskiwania i magazynowania energii, należą do nich również układy mechaniczne, pneumatyczne bądź układy będące ich kombinacją [3, 5].

2. Ruch pojazdu

Parametry ruchu pojazdu w dużej mierze uzależnione są od jego obciążenia, które wpływa na wartość:

- siły oporu toczenia;
- siły bezwładności;
- siły tarcia wewnętrznego.

Ponadto istotny wpływ na obciążenie pojazdu może mieć siła oporu powietrza, która w przypadku autobusu już dla stosunkowo niewielkich prędkości nabiera znaczenia. Całkowite obciążenie układu napędowego jest sumą wyżej wymienionych sił. Określenie wartości poszczególnych (ww.) sił pozwoliło na wyznaczenie zapotrzebowania na moc i moment obrotowy

Streszczenie: W pracy przedstawiono wybrane sposoby odzyskiwania oraz magazynowania energii wytworzonej podczas hamowania pojazdu użytkowanego na potrzeby transportu publicznego na terenach miejskich. Omówiono podstawowe fazy pracy elektromechanicznego układu napędowego autobusu poruszającego się jedną z wybranych tras komunikacyjnych w dużej aglomeracji miejskiej, gdzie wybrana trasa została przyjęta jako trasa testowa. Omówiono współpracę układu napędowego z pojedynczym oraz z dwoma zasobnikami (magazynami) energii o parametrach dobranych do wariantów przejazdu trasą testową. Przeanalizowano ilość odzyskiwanej energii w stosunku do ilości energii niezbędnej do przebycia wybranej trasy, a ponadto zwrócono uwagę na trwałość głównego i pomocniczego źródła zasilania, które jednocześnie służą do odbioru i magazynowania energii odzyskiwanej podczas hamowania. Omówiono wybrane warunki opłacalności odzyskiwania energii.

Słowa kluczowe: autobus elektryczny, napęd elektryczny

Abstract: The document describes selected methods of recovering and storing energy generated during breaking a vehicle (bus) intended for collective passenger transport in urban areas. Basic operate phases of electromechanical propulsion system of bus was described where to take in to account real communication route as a testing route. The work of the electromechanical drive system with single and with two cooperating energy storage (storages) units was analyzed. A propulsion system powered from a source or sources of energy with different capacities provided for the test route variants, that are the equivalent of one of the real routes served by public transport plants, was tested. The amount of recovered energy was analyzed in relation to the amount of energy necessary to travel the selected route. The durability of the main and cooperated auxiliary power source, operated as the storage of energy recovered during vehicle braking, was analyzed. Selected profitability conditions for energy recovery were analyzed.

Keywords: electrical bus, electrical propulsion

silnika, zapewniający wymagane parametry ruchu w cyklu jazdy w ruchu miejskim.

Dla potrzeb odzyskiwania energii szczególnego znaczenia nabiera masa własna pojazdu oraz jego obciążenie (w tym przypadku obciążenie pasażerskie). Duża masa całkowita pogarsza

warunki pracy układu napędowego pojazdu, jednak paradoksalnie ma korzystny wpływ na ilość odzyskiwanej energii.

3. Praca układu odzyskiwania energii podczas hamowania

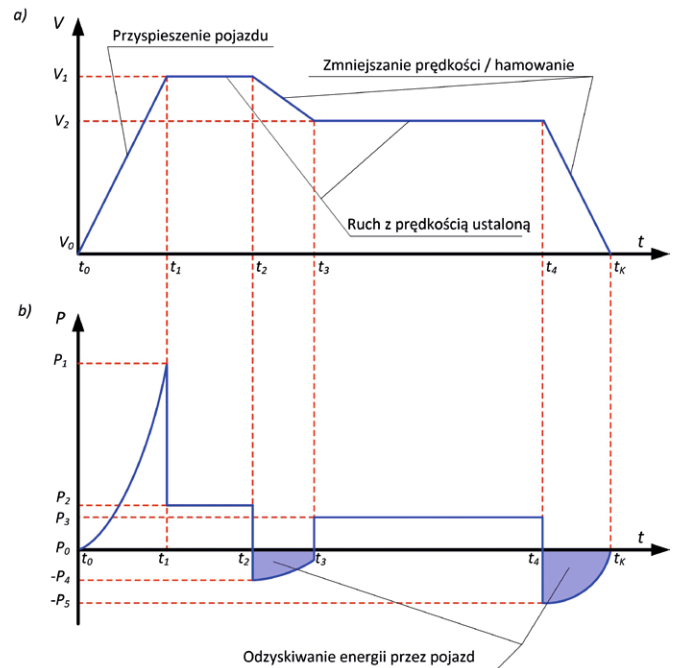
Jak już wspomniano, układ odzyskiwania energii nabiera szczególnego znaczenia między innymi podczas jazdy miejskiej, która charakteryzuje się stosunkowo dużą dynamiką zmian prędkości, a więc poza ruszaniem i przyspieszaniem wymaga częstego zmniejszania prędkości bądź całkowitego zatrzymania. Przy ruszaniu z miejsca i przy przyspieszaniu zapotrzebowanie na moc i moment obrotowy silnika napędowego jest znacznie większe niż przy jeździe ustalonej (jazda ze stałą prędkością), gdyż istnieje potrzeba pokonania zarówno oporów ruchu, jak i zwiększenia energii kinetycznej pojazdu [4]. Na rys. 1 przedstawiono przykładowy fragment przebiegu ruchu autobusu w cyklu miejskim. Gęsta sieć miejskich przystanków autobusowych, skrzyżowania i sygnalizacja świetlna oraz warunki ruchu powodują, że autobusy poruszają się ze stałą prędkością jedynie na krótkich odcinkach trasy. Ocenia się, że odzysk energii hamowania i jej ponowne wykorzystanie, np. przy ruszaniu, pozwoli zmniejszyć zużycie energii przy jeździe w mieście nawet o około 30% [2].

Przykładowy przebieg ruchu pojazdu (rys. 1) przedstawia podstawowe fazy ruchu autobusu w warunkach miejskich, to jest ruszanie z miejsca i rozpędzanie w czasie $t_0 \div t_1$, gdzie moc silnika napędowego wzrasta do wartości P_1 , jazda z prędkością ustaloną w przedziałach czasu $t_1 \div t_2$ oraz $t_3 \div t_4$ z mocą odpowiednio P_2 i P_3 wystarczającą do utrzymania stałej prędkości autobusu. Zmniejszenie prędkości przedziale czasu $t_2 \div t_3$ oraz hamowanie $t_4 \div t_K$ do zatrzymania. W fazie zmniejszania prędkości $t_2 \div t_3$ oraz w fazie hamowania pojazdu (autobusu) $t_4 \div t_K$ możliwe jest odzyskiwanie energii. Przy czym w przedziale czasu $t_2 \div t_3$ zmniejszanie prędkości odbywa się tylko poprzez hamowanie silnikiem, który w tym przypadku przechodzi w tryb pracy generatorowej lub przez współpracę silnika pracującego jako generator i układu hamulcowego, jeśli jest taka potrzeba. Podobny proces hamowania może mieć miejsce w przedziale czasu $t_4 \div t_K$. Należy zwrócić uwagę, że przy hamowaniu z niewielkiej prędkości, np. „do zera”, hamowanie generatorowe może być mało efektywne.

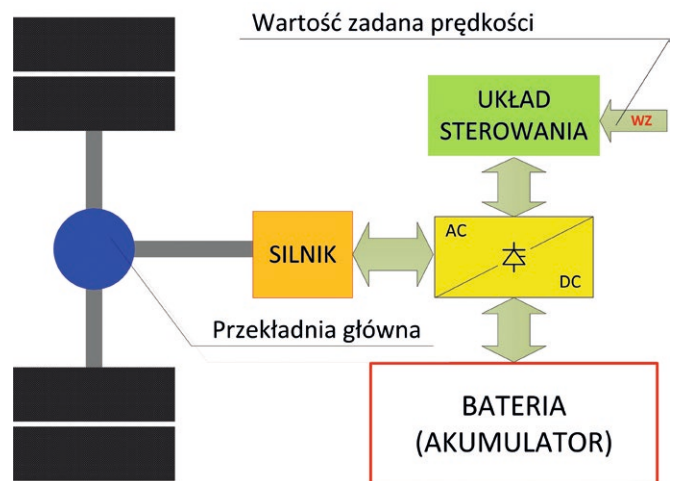
4. Odbiór i magazynowanie energii rekuperacji

Celem odbioru i magazynowania energii wytworzonej podczas hamowania stosowane są układy mechaniczne oraz elektryczne. Wśród akumulatorów mechanicznych najczęściej spotyka się akumulatory kinetyczne, inercyjne, hydropneumatyczne oraz tłokowe.

Obecnie jednak rozwiązania mechaniczne są stosowane coraz rzadziej w pojazdach drogowych i ustępują miejsca energoelektronice. Jako elektryczne układy rekuperacji stosuje się różnego rodzaju akumulatory elektrochemiczne współpracujące z przekształtnikami elektroenergetycznymi, dostosowującymi parametry energii na potrzeby jej odbioru i magazynowania oraz przesyłu między źródłem (np. akumulatorem) a odbiornikiem (silnik napędowy).



Rys. 1. Podstawowe fazy ruchu pojazdu (autobusu) (a), zapotrzebowanie na moc niezbędną do rozpędzania oraz moc oddawana przez układ napędowy podczas hamowania rekuperacyjnego, która może być odebrana i zmagazynowana (b) [2]



Rys. 2. Przykład uproszczonego schematu blokowego elektrycznego układu napędowego z możliwością odzyskiwania energii wykorzystującego jeden zasobnik energii

Na rys. 2 przedstawiono uproszczony schemat blokowy układu napędowego wykorzystujący tylko jeden zasobnik energii. Zastosowane źródło zasilania (bateria – akumulator) ma zdolność oddawania i przyjmowania energii, co jest warunkiem koniecznym rekuperacji. Należy zwrócić uwagę w szczególności na możliwości przyjmowania energii odzyskanej w takim układzie, gdyż magazyn energii (akumulator) powinien mieć zdolność przyjęcia dużej ilości energii w stosunkowo krótkim czasie, przy czym proces ten w warunkach ruchu miejskiego

może powtarzać się bardzo często po trasie autobusu o stosunkowo dużej gęstości rozmieszczenia przystanków, sygnalizacji świetlnej itp.

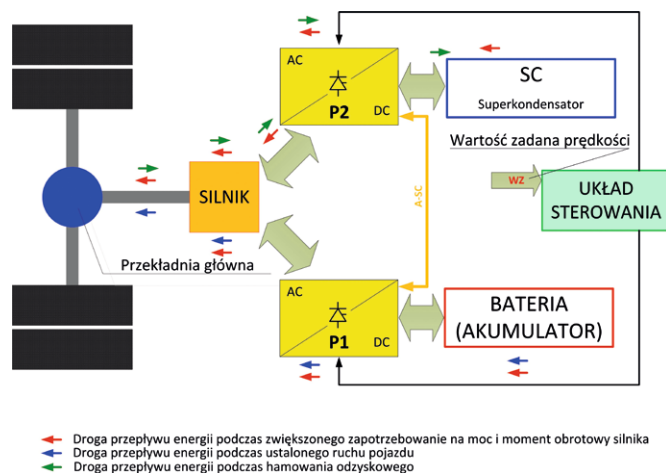
Jako źródło energii w układach rekuperacji najczęściej wykorzystywany jest silnik napędowy, który na potrzeby rekuperacji pracuje jako generator. Przy czym najprawdopodobniej urządzenie (silnik) zaprojektowane *stricto* do pracy silnikowej, przy której osiąga wysoką sprawność, w warunkach pracy generatorowej zazwyczaj będzie pracowało ze znacznie mniejszą sprawnością, zatem nie jest możliwe, aby odzyskać podczas hamowania 100% energii zużytej na rozpędzanie pojazdu. Energia pobrana z akumulatora poprzez przekształtnik DC-AC przekazywana jest bezpośrednio do silnika, przy czym parametry energii są dopasowywane na podstawie sygnałów z układu sterowania w taki sposób, aby zapewnić właściwe parametry jazdy zgodne z wymaganiami, na które może mieć wpływ technologia, w jakiej został wykonany zasobnik (magazyn) energii. Przekształtnik DC-AC/AC-DC (P_1 i P_2) powinien być przekształtnikiem dwukierunkowym, tj. umożliwiającym zasilanie silnika z baterii – akumulatora, ale także umożliwiającym ładowanie akumulatora energią odzyskaną w silniku pracującym jako generator. Pożądana może być również zdolność podwyższania lub obniżania napięcia zarówno po stronie AC, jak i DC, w zależności od aktualnej potrzeby. Rozwinięciem układu z rys. 2 jest układ wyposażony w dwa źródła energii – główne i pomocnicze – co przedstawia rys. 3. W tym przypadku istnieje możliwość znacznego odciążenia akumulatora (baterii) w stanach dynamicznych pojazdu, gdzie podczas procesu przyspieszania największa ilość energii może pochodzić z zasobnika pomocniczego. Podobnie jak i podczas rekuperacji, pomocniczy zasobnik energii (w tym przypadku superkondensator SC) odbiera stosunkowo dużą jej ilość w krótkim czasie.

Stosunkowo niewielka część energii podczas stanów dynamicznych przepływa przez główny magazyn energii, co zapewnia korzystniejsze warunki jego pracy zarówno podczas rozładowywania, jak i ładowania. W układzie przedstawionym na rys. 3 w stanie ustalonym ruchu autobusu energia jest pobierana tylko z głównego zasobnika energii. Celem utrzymania zdolności do pracy pomocniczego zasobnika energii okresowo w razie potrzeby jest on doładowywany z głównego źródła zasilania przez połączenie A-SC [1, 3, 5].

Doładowanie pomocniczego zasobnika energii SC z głównego akumulatora (baterii) powinno uwzględniać potrzeby rekuperacji, czyli odbywać się w sposób zapewniający „wolną przestrzeń energetyczną” na potrzeby przyjęcia energii odzyskanej podczas hamowania, gdyż przewiduje się, że to właśnie ten element będzie najbardziej obciążony podczas hamowania pojazdu (przyjmowanie energii odzyskanej).

Możliwe jest również przekazywanie części energii odzyskiwanej podczas hamowania do głównego źródła energii – akumulatora. Jednak zwykle zdecydowanie większą trwałość posiadają zasobniki energii typu superkondensatorowego (np. kilka milionów cykli pracy) w porównaniu do akumulatorów (co najwyżej kilka tysięcy).

Jeżeli wskutek rekuperacji zostanie zajęta cała „wolna przestrzeń” zasobnika energii, przewiduje się możliwość wytracania odzyskanej energii w układach rezystancyjnych, przez co



Rys. 3. Uproszczony schemat blokowy układu napędowego wyposażonego w dwa źródła energii (główne – bateria i pomocnicze – superkondensator SC)

układ zachowuje zdolność pracy jako retarder, co jest niesłychanie istotne w warunkach częstego hamowania lub np. jazdy w warunkach górskich.

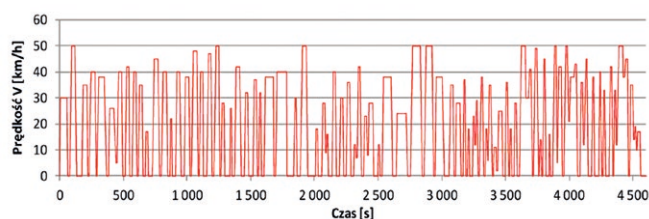
5. Badania symulacyjne

Do badań symulacyjnych opracowano model ruchu autobusu, opierając się na obliczeniach sił działających na pojazd, podanych w rozdziale 2. Profil ruchu został oparty na znormalizowanym cyklu (SORT 2) w warunkach miejskich przy uwzględnieniu jednej ze stołecznych tras komunikacyjnych. Na potrzeby badań przyjęto autobus z napędem elektrycznym o możliwościach przewozowych podobnych, jak oferuje obecnie będący w eksploatacji dwuczłonowy Solaris Urbino 18 o napędzie konwencjonalnym. Dla potrzeb analizy symulacyjnej zastosowano układy napędowe autobusu wyposażone w jeden bądź dwa zasobniki energii. W przypadku dwóch zasobników energii pierwszy stanowi główny magazyn energii, a drugi zasobnik pełni funkcję pomocniczego źródła zasilania układu napędowego.

Tabela 1. Wybrane podstawowe parametry pojazdu

Powierzchnia czynna pojazdu	7,8 [m ²]
Współczynnik oporu powietrza	1,5
Masa pojazdu bez akumulatorów	14 000 [kg]
Ilość kół pojazdu	8
Promień koła	0,4 [m]
Prędkość maksymalna w ruchu miejskim	50 [km/godz]
Przyspieszenie	do 1 [m/s ²]*
Maksymalna ilość przewożonych osób	176

Jako główne źródło energii przewidziano akumulator litowo-jonowy, zaś jako źródło pomocnicze zastosowano superkondensator. W szczególności brano pod uwagę trwałość zastosowanego źródła bądź źródeł energii. W przypadku dwóch źródeł energii analizowano ich wzajemną współpracę, w szczególności w kontekście możliwości odzyskiwania energii podczas hamowania. Podstawowe parametry pojazdu



Rys. 4. Przebieg zmian prędkości autobusu na jednej z warszawskich tras komunikacji miejskiej

przedstawiono w tabeli 1. Na rys. 4 przedstawiono profil zmian prędkości autobusu przyjęty do badań symulacyjnych. Profil odwzorowuje jedną z rzeczywistych tras komunikacji miejskiej. W badaniach symulacyjnych rozpatrzono dwa główne przypadki układu napędowego zdolnego do odzyskiwania energii. W pierwszym wariancie rozpatrzono układ z pojedynczym magazynem energii przeznaczonym do zasilania układu napędowego oraz do odbioru i magazynowania energii pochodzącej z rekuperacji. W drugim wariancie wprowadzono pomocniczy zasobnik energii, którego zadaniem jest odciążenie głównego źródła energii w zakresie przepływu mocy, jak i częstotliwości pracy ze zwiększonym obciążeniem, co ma miejsce w stanach dynamicznych pojazdu, w szczególności w warunkach obsługi linii pasażerskiej komunikacji miejskiej.

Kolejne badania przeprowadzono jako rozwinięcie drugiego głównego wariantu, polegającego na modyfikacji stopnia współpracy głównego i pomocniczego zasobnika energii na potrzeby odzyskiwania energii, ale też i udziału poszczególnych magazynów energii na potrzeby rozpędzania pojazdu. W przypadku ruchu w warunkach ustalonych pomocniczy zasobnik energii nie bierze udziału w zasilaniu układu napędowego, natomiast w miarę potrzeby jest doładowywany z głównego zasobnika energii celem zapewnienia właściwej wydajności energetycznej w stanach wymuszających zwiększone zapotrzebowanie na energię. W tabeli 2 podano wybrane wyniki badań symulacyjnych układu napędowego wyposażonego w pojedynczy zasobnik energii. Założono sprawność układu napędowego i sprawność układu odzyskiwania energii na poziomie 80%. Wykorzystując badania symulacyjne, określono stopień zużycia głównego i pomocniczego zasobnika energii na potrzeby ruchu pojazdu oraz zużycie zasobników energii tylko na potrzeby odbioru energii pochodzącej z rekuperacji.

W tabeli 2 przedstawiono wybrane wyniki badań dla układu napędowego autobusu wyposażonego w pojedynczy zasobnik energii. Tabela 3 zawiera zestawienie wybranych wyników badań symulacyjnych układu napędowego autobusu poruszającego się w warunkach miejskich, wyposażonego w dwa zasobniki energii – główny i pomocniczy.

6. Wnioski

Elektryczny układ napędowy zasilany z jednego źródła energii wymaga pozostawienia „wolnej pojemności” zasobnika energii na potrzeby rekuperacji, co może pociągać za sobą konieczność zwiększenia pojemności źródła energii, co z jednej strony może sprzyjać wydłużeniu jego trwałości, a drugiej strony zmusza zasobnik do intensywniejszej pracy na rzecz przewożenia „samego siebie”, co ma szczególne znaczenie w stanach

Tabela 2. Wybrane wyniki badań układu napędowego autobusu poruszającego się w warunkach miejskich i wyposażonego w pojedynczy zasobnik energii

Pojemność akumulatora	[kWh]	64,8	64,8	64,8	64,8	64,8
Obciążenie	[%]	100	50	30	10	1
Nominalny poziom energii akumulatora	[kWh]	64,85	64,85	64,85	64,85	64,85
Suma energii pobranej z akumulatora – przyspieszanie / jazda ustalona	[kWh]	64,46	50,68	45,20	39,72	37,22
Suma energii oddanej do akumulatora podczas hamowania odzyskowego	[kWh]	19,41	14,73	12,88	11,02	10,17
Liczba cykli pracy akumulatora – przyspieszanie / jazda ustalona		0,50	0,39	0,35	0,31	0,29
Liczba cykli pracy akumulatora tylko na potrzeby odzyskiwania energii podczas hamowania		0,16	0,12	0,11	0,09	0,09
Liczba cykli pracy akumulatora – przyspieszanie / jazda ustalona / hamowanie odzyskowe		0,66	0,51	0,46	0,40	0,37
Zużycie akumulatora – przyspieszanie / jazda ustalona	[%]	0,061	0,048	0,043	0,037	0,035
Zużycie akumulatora tylko na potrzeby odzysku energii podczas hamowania	[%]	0,018	0,013	0,011	0,010	0,009
Zużycie akumulatora – przyspieszanie / jazda ustalona / odzysk energii podczas hamowania	[%]	0,076	0,059	0,052	0,046	0,043

dynamicznych pojazdu. „Dodatkowa pojemność” może mieć wpływ na prędkość ładowania akumulatora, zazwyczaj akumulatory o większej pojemności mają zdolność przyjmowania większej ilości energii w jednostce czasu, co jest właściwością przydatną dla potrzeb rekuperacji. Paradoksalnie niekorzystna z punktu widzenia ruchu pojazdu duża masa (ciężkie akumulatory, obciążenie pasażerskie), która niekorzystnie wpływa na zdolność przyspieszenia i zwiększa opory podczas jazdy ustalonej, jest korzystna z punktu widzenia rekuperacji. Zazwyczaj duża masa pojazdu pozwala na zwiększenie ilości energii odzyskiwanej podczas hamowania. Na podstawie badań symulacyjnych ocenia się, że w sprzyjających warunkach można odzyskać około 30% energii. Na ilość odzyskanej energii będzie miała wpływ tzw. „trudność cyklu jazdy”, to jest częstotliwość hamowania, jego intensywność, długość odcinków trasy pokonywanych z prędkością ustaloną bez konieczności zmniejszenia prędkości związanej z hamowaniem. Na sprawność odzyskiwania energii podczas hamowania może również wpływać technologia wykonania przekształtników energoelektronicznych oraz ich obciążenie (punkt pracy). Optymalna praca takiego przekształtnika w zmiennych warunkach rekuperacji będzie zazwyczaj utrudniona lub niemożliwa do osiągnięcia. Maszyna zaprojektowana głównie do pracy silnikowej zazwyczaj nie osiągnie podobnie wysokiej sprawności podczas pracy generatorowej, czyli w procesie odzyskiwania energii podczas hamowania. Mała intensywność hamowania odzyskowego może

Tabela 3. Wybrane wyniki badań układu napędowego autobusu poruszającego się w warunkach miejskich i wyposażonego w dwa zasobniki energii – główny i pomocniczy

7	6	5	4	3	2	1		Lp.
290,0	72,0	64,8	64,8	64,8	64,8	64,8	[kWh]	Pojemność akumulatora
100	100	1	10	30	50	100	[%]	Obciążenie pojazdu
2,3	2,2	1,2	1,2	1,4	1,6	2,2	[kWh]	Energia odzyskana podczas hamowania i przekazana do akumulatora
20,9	19,5	10,4	11,2	13,0	14,8	19,4	[kWh]	Energia odzyskana podczas hamowania i przekazana do SC
290,0	85,0	64,9	64,9	64,9	64,9	64,9	[kWh]	Nominalny poziom energii akumulatora
32,1	30,3	18,9	19,9	22,2	24,5	30,2	[kWh]	Energia oddana przez akumulator na rozpędzanie pojazdu i jazdę ustaloną
39,0	36,9	22,6	23,9	26,8	29,6	36,9	[kWh]	Suma energii przepływającej przez akumulator – rozpędzanie / jazda ustalona / doładowanie SC / rekuperacja
249,3	35,1	42,2	40,9	38,0	35,3	28,0	[kWh]	Poziom energii akumulatora po przebyciu trasy testowej z uwzględnieniem doładowania SC i rekuperacji
3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	[kWh]	Nominalny poziom energii SC
38,2	35,6	19,6	21,0	24,2	27,5	35,5	[kWh]	Energia oddawana przez SC na potrzeby rozpędzania pojazdu
63,2	59,1	32,3	34,7	40,1	45,4	59,0	[kWh]	Suma energii przepływającej przez SC – rozpędzanie / doładowanie własne SC / rekuperacja
0,056	0,210	0,146	0,154	0,171	0,189	0,233	–	Liczba cykli pracy akumulatora na rozpędzanie pojazdu i jazdę ustaloną
0,004	0,015	0,009	0,010	0,011	0,013	0,016	–	Liczba cykli pracy akumulatora tylko na potrzeby odbioru energii podczas hamowania
0,068	0,256	0,174	0,185	0,207	0,228	0,284	–	Liczba cykli pracy akumulatora – rozpędzanie / jazda ustalona / doładowanie SC / rekuperacja
5,30	4,94	2,71	2,92	3,36	3,81	4,92	–	Liczba cykli pracy SC na rozpędzanie pojazdu
2,90	2,70	1,43	1,55	1,80	2,05	2,69	–	Liczba cykli pracy SC na potrzeby odzyskiwania energii podczas hamowania
8,77	8,20	4,47	4,81	5,56	6,30	8,18	–	Liczba cykli pracy SC na rozpędzanie / „doładowanie własne” SC / odzysk energii podczas hamowania
0,007	0,026	0,018	0,019	0,021	0,024	0,029	[%]	Zużycie akumulatora tylko na potrzeby rozpędzania pojazdu i jazdy ustalonej
0,0010	0,0039	0,0025	0,0027	0,0031	0,0034	0,0043	[%]	Zużycie akumulatora na doładowanie SC podczas postoju i jazdy ustalonej
0,0005	0,0019	0,0011	0,0012	0,0014	0,0016	0,0021	[%]	Zużycie akumulatora na potrzeby przyjmowania energii odzyskanej podczas hamowania
0,0080	0,0321	0,0223	0,0232	0,0260	0,0292	0,0361	[%]	Zużycie akumulatora – rozpędzanie / jazda ustalona / doładowanie SC / rekuperacja
0,00035	0,00033	0,00018	0,00019	0,00022	0,00025	0,00033	[%]	Zużycie SC tylko na potrzeby rozpędzania pojazdu
0,00019	0,00018	0,00010	0,00010	0,00012	0,00014	0,00018	[%]	Zużycie SC tylko na odzysk energii podczas hamowania
0,00059	0,00055	0,00030	0,00032	0,00037	0,00042	0,00055	[%]	Zużycie SC – rozpędzenie pojazdu / „doładowanie własne” SC / rekuperacja

uczynić rekuperację nieuzasadnioną ze względu na „potrzeby własne” układu odzyskiwania energii (zasilanie przekształtnika lub przekształtników, straty w przepływie energii). Korzystne wydaje się być zastosowanie dwóch współpracujących zasobników energii: głównego i pomocniczego. Zasobnik pomocniczy może w istotny sposób odciążyć, szczególnie w stanach dynamicznych ruchu pojazdu, główny zasobnik energii, zwiększając jego trwałość np. poprzez ograniczenie ilości energii przepływającej w jednostce czasu. Pomocniczy zasobnik energii typu superkondensatorowego zwykle ma większe zdolności przyjmowania dużych ilości energii w krótkim czasie niż powszechnie stosowany akumulator litowo-jonowy. Zastosowanie pomocniczego zasobnika energii może zapewnić większą temperaturową stabilność pracy, niesłychanie ważną w przypadku akumulatorów Li-Ion, trwałość samego superkondensatora w tym przypadku również będzie wydłużona, gdyż ze względu na pracę przekształtników, a co za tym idzie potrzebę utrzymania napięcia wejściowego przekształtnika w odpowiednim zakresie, superkondensator będzie pracował, jedynie wykorzystując „część swojej pojemności”, co spowoduje, że na jeden pełny cykl pracy superkondensatora złożony się np. kilka podcykli ładowania i rozładowania.

Literatura

- [1] CZERWIŃSKI A.: *Akumulatory, baterie, ogniwa*. WKŁ, Warszawa 2016.
- [2] SZUMANOWSKI A.: *Akumulacja energii w pojazdach*. WKiŁ, Warszawa 2008.
- [3] MERKISZ J., PIELECHA I.: *Alternatywne napędy pojazdów*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2006.
- [4] High energy density with ultracapacitors. Bursting with power, Siemens Matsushita Components, 2009.
- [5] GUZIŃSKI J.: *Pojazd elektryczny z układem napędowym z silnikiem indukcyjnym klatkowym*. Katedra Automatyki Napędu Elektrycznego WEiA, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2013.



Marcin Biernacki, Przemysław Majewski
Instytut Energetyki Instytut Badawczy, Warszawa