

Marcin Biernacki, Przemysław Majewski
Instytut Energetyki Instytut Badawczy, Warszawa

ANALIZA MOŻLIWOŚCI ODZYSKIWANIA ENERGII PRZEZ ELEKTRYCZNY UKŁAD NAPEŁDOWY POJAZDU DO PRZEWOZU OSÓB NA POTRZEBY AUTOBUSOWEGO TRANSPORTU ZBIOROWEGO KOMUNIKACJI MIEJSKIEJ

ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF ENERGY RECOVERY BY THE VEHICLE ELECTRIC DRIVE SYSTEM FOR THE CARRIAGE OF PERSONS FOR THE BUS OF COLLECTIVE URBAN COMMUNICATION

Streszczenie: W pracy omówiono sposoby odzyskiwania oraz magazynowania energii wytworzonej podczas hamowania pojazdu przeznaczonego do zbiorowego transportu pasażerskiego na terenach miejskich. Przeanalizowano pracę elektromechanicznego układu napędowego z pojedynczym oraz z dwoma współpracującymi zasobnikami (magazynami) energii. Badano układ napędowy zasilany ze źródła bądź źródeł energii o różnych pojemnościach przewidzianych odpowiednio do wariantów przejazdu trasą testową, będącą odpowiednikiem jednej z rzeczywistych tras obsługiwanych przez zakłady komunikacji miejskiej. Przeanalizowano trwałość głównego i współpracującego z nim pomocniczego źródła zasilania oraz magazynowania energii odzyskanej podczas hamowania pojazdu. Przeanalizowano wybrane warunki opłacalności odzyskiwania energii.

Abstract: The document describes methods of recovering and storing energy generated during breaking a vehicle intended for collective passenger transport in urban areas. 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 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.

Słowa kluczowe: autobus elektryczny, napęd elektryczny
Keywords: electrical bus, electrical propulsion

1. Wstęp

Pierwsze pojazdy elektryczne pojawiły się już w latach trzydziestych dziewiętnastego wieku. Wówczas do ich zasilania wykorzystywano ogniwo Volty co znacznie ograniczało parametry jezdne ówczesnych pojazdów. Zdecydowanie przyspieszenie rozwoju pojazdów elektrycznych nastąpiło wraz z wynalezieniem przez Francuza Gastona Planté w roku 1859 akumulatora kwasowo - ołowiowego. Znaczący postęp, jaki dokonał się wraz z pojawieniem się nowego źródła energii elektrycznej nie skierował jednak uwagi na możliwości odzyskiwania energii podczas hamowania pojazdu. Skupiano się wówczas na poprawie osiągnięć pojazdu i poprawie jego parametrów jezdnych co już w roku 1899 pozwoliło na przekroczenie przez pojazd elektryczny magicznej wówczas bariery 100 km/godz. Wiek XX rozszerzył spojrzenie na elektryczne układy napędowe pojazdów i rozpoczęto próby budowy układów umożliwiających rekuperację.

Prowadzono prace nad różnymi układami magazynowania i oddawania energii pochodzącej z procesu hamowania w tym nad układami mechanicznymi, pneumatycznymi i itp. Z biegiem czasu rozwój energoelektroniki sprawił, że coraz częściej odchodzono od mechanicznych układów odzyskiwania i magazynowania energii na rzecz układów elektrycznych [3][5].

2. Analiza ruchu pojazdu

Możliwości odzyskiwania energii podczas hamowania uzależnione są od parametrów ruchu elektrycznego pojazdu w tym przypadku, pojazdu komunikacji miejskiej. Na potrzeby ww. analizy określono zapotrzebowanie na moc i moment obrotowy silnika podczas cyklu jazdy w ruchu miejskim, co w dalszej perspektywie pozwoliło na ocenę możliwości odbioru, magazynowania i przetwarzania energii pocho-

dzącej z rekuperacji. Na potrzeby niniejszej pracy dokonano uproszczonych obliczeń oporów ruchu pojazdu, na które składają się:

- siła oporu toczenia,
- siła bezwładności,
- siła tarcia wewnętrznego,
- siła oporu aerodynamicznego.

Całkowita siła oporu ruchu będzie sumą wyżej wymienionych składowych.

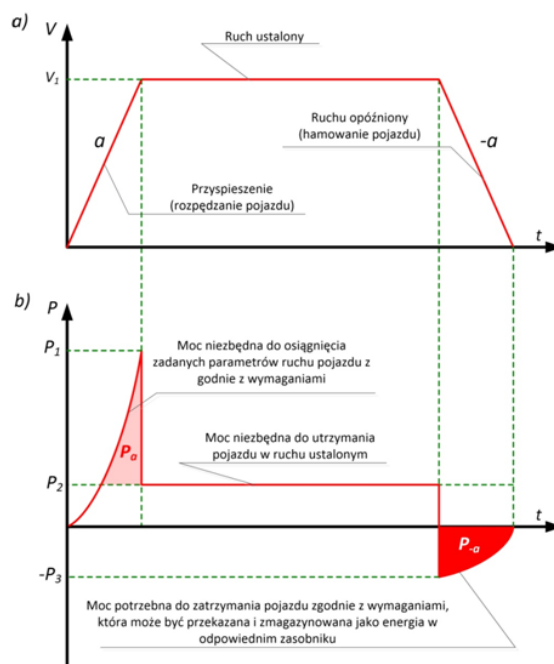
3. Ogólna charakterystyka pracy układów odzyskiwania energii podczas hamowania

Jazda w mieście pojazdu mechanicznego nie odbywa się przy stałej prędkości, a wymaga częstego zwalniania i zatrzymywania się oraz ruszania i przyspieszania. Przy ruszaniu z miejsca i przy przyspieszaniu pojazdu 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 pojazdu 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. Najczęściej realizowane są fazy ruszania, przyspieszania i hamowania. Ocenia się, że odzysk energii hamowania i jej ponowne wykorzystanie przy ruszaniu autobusu pozwoli zmniejszyć zużycie energii przy jeździe w mieście nawet o około 30% [2]. Przykład ruchu pojazdu (rys. 1) przedstawia podstawowy przebieg zmian parametrów ruchu i odpowiadające mu zapotrzebowanie na moc wymaganą do osiągnięcia wymaganej prędkości w określonym czasie, moc niezbędną do utrzymania ruchu z prędkością ustaloną i moc potrzebną do zatrzymania pojazdu w określonym czasie, ta ostatnia może być przetworzona na energią odzyskaną podczas hamowania i magazynowana w odpowiednim zasobniku energii.

4. Odbiór i magazynowanie energii powstałej w skutek hamowania

Na potrzeby odbioru i magazynowania energii wytworzonej podczas hamowania stosowane są układy mechaniczne oraz elektryczne. Wśród akumulatorów mechanicznych najczęściej spotyka się akumulatory kinetyczne, inercyjne, hy-

dropneumatyczne oraz tłokowe. Wśród elektrycznych układów rekuperacji stosuje się różnego rodzaju akumulatory elektrochemiczne współpracujące z układami elektroenergetycznymi przekształtnikami dostosowującymi parametry energii na potrzeby jej odbioru i magazynowania oraz przesyłu między źródłem (np.: akumulatorem) a odbiornikiem (silnik napędowy).

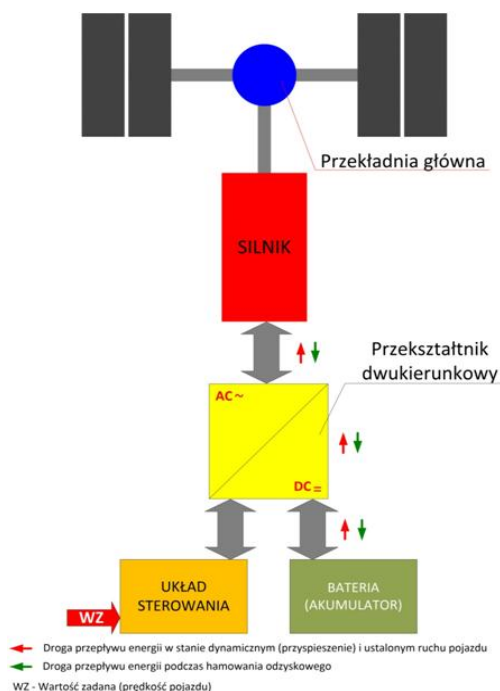


Rys. 1. Zmiana prędkości autobusu w ruchu miejskim (a), zapotrzebowanie na moc niezbędną do rozpędzania oraz wytracenia prędkości (moc która może być oddawana przez układ napędowy) (b)[2]

5. Elektromechaniczny odbiór i magazynowanie energii powstałej w skutek hamowania pojazdu.

Przykład podstawowego układu napędowego wyposażonego w możliwość rekuperacji przedstawia rys. 2. Układ zawiera jedynie jedno źródło energii mające zdolność jej oddawania i przyjmowania. 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 może powtarzać się bardzo często w wyniku ruchu miejskiego pojazdu (autobusu) o stosunkowo dużej gęstości rozmieszczenia przystanków, sygnalizacji świetlnej itp. W układach rekuperacji jako źródło energii najczęściej wykorzystywany jest silnik napędowy, który na

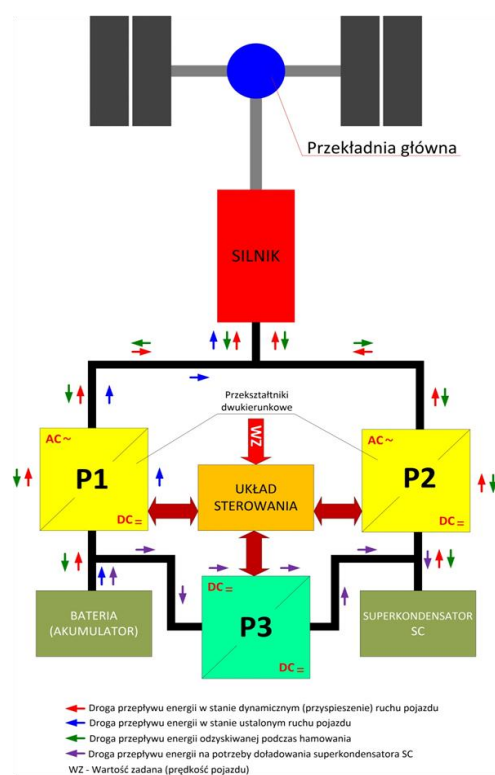
potrzeby rekuperacji pracuje jako generator. Przy czym trzeba zwrócić uwagę, że urządzenie zaprojektowane do pracy silnikowej przy, której osiąga wysoką sprawność, w pracy generatorowej zazwyczaj będzie pracowało ze znacznie mniejszą sprawnością, zatem nie możliwe jest aby odzyskać podczas hamowania 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. Przekształtnik AC-DC nie tylko powinien być przekształtnikiem dwukierunkowym tj. umożliwiającym zasilanie silnika z baterii – akumulatora ale też przekształtnikiem mającym podwyższać lub obniżać napięcie w zależności od aktualnej potrzeby. Rozwinięciem układu z rysunku 2 jest układ wyposażony w dwa źródła energii – główne i pomocnicze co przedstawia rys. 3.



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

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 po-

dobnie 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 pojazdu (tu autobusu) energia jest pobierana tylko z głównego zasobnika energii, okresowo zaś na potrzeby doładowania z pomocniczego zasobnika energii celem utrzymania jego zdolności do pracy w stanach dynamicznych [1][3][5].



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

Ponadto superkondensator może posiadać „wolną przestrzeń energetyczną” na potrzeby przyjęcia energii pochodzącej z rekuperacji, gdyż przewiduje się, że to właśnie ten element będzie najbardziej obciążony podczas hamowania pojazdu (przyjmowanie energii odzyskanej). Jeżeli w skutek rekuperacji zostanie zajęta cała „wolna przestrzeń” zasobnika energii przewiduje się, możliwość wytracania odzyskanej energii w układach rezystancyjnych przez co układ zachowuje zdolność pracy jako retarder

co jest niesłychanie istotne w warunkach częstego hamowania lub np.: jazdy w warunkach górskich.

6. Badania symulacyjne

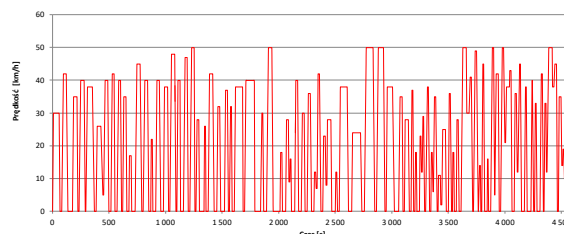
Do badań symulacyjnych opracowano model ruchu pojazdu opierając się na obliczeniach sił działających na pojazd podanych w rozdziale 2. Profil ruchu pojazdu został oparty na znormalizowanym cyklu (SORT 2) ruchu autobusu w warunkach miejskich przy uwzględnieniu jednej ze stołecznych tras komunikacyjnych. Na potrzeby badań przyjęto autobus z napędem elektrycznym o możliwościach przewozowych podobnych jak oferuje obecnie będący w eksploatacji dwuczłonowy autobus 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 pojazdu. 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 przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wybrane podstawowe parametry pojazdu

Powierzchnia czynna pojazdu	7,8 [m ²]
Współczynnik oporu powietrza	1,5
Masa pojazdu bez akumulatorów	14000 [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

Na rys. 4 przedstawiono profil zmian prędkości pojazdu przyjęty do badań symulacyjnych. Profil odwzorowuje jedną z rzeczywistych tras komunikacji miejskiej. W badaniach symulacyjnych rozpatrzono dwa główne przypadki układu napędowego zdolnego odzyskiwać energii. W pierwszym wariantcie rozpatrzono układ z pojedynczym magazynem energii przeznaczonym do zasilania układu napędowego oraz do obioru i magazynowania energii pochodzącej z rekuperacji. W drugim wariantcie

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 obsługiwaniania linii pasażerskiej komunikacji miejskiej.



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

Kolejne badania przeprowadzono jako rozwinięcie drugiego głównego wariantu polegające na modyfikacji stopnia współpracy głównego i pomocniczego zasobnika energii na potrzeby odzyskiwania energii ale też i udziału poszczególnych magazynów energii na potrzeby rozpędzania pojazdu.

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
Sprawność układu napędowego	[%]	80	80	80	80	80
Sprawność układu odzyskiwania energii	[%]	80	80	80	80	80
Spodziewany prąd maksymalny akumulatora – przyspieszanie / jazda ustalona	[A]	826	636	561	485	451
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
Poziom energii akumulatora po jednym cyklu jazdy bez hamowania odzyskowego	[kWh]	10,34	14,12	19,60	25,08	27,58
Poziom energii akumulatora po jednym cyklu jazdy z hamowania odzyskowym	[kWh]	19,80	28,90	32,52	36,15	37,80

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.

Na podstawie badań symulacyjnych określono stopień zużycia głównego i pomocniczego zasobnika energii na potrzeby ruchu pojazdu przy szczególnym uwzględnieniu zużycia zasobników energii tylko na potrzeby odzyskiwania energii. W tabeli 2 przedstawiono wybrane wyniki badań dla pojazdu wyposażonego w pojedynczy zasobnik energii. Tabela 3 zawiera zestawienie wybranych wyników badań symulacyjnych układu napędowego autobusu poruszającego się w warunkach miejskich i wyposażonego w dwa zasobniki energii główny i pomocniczy.

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

Lp.	Pojemność akumulatora [kWh]	Obciążenie pojazdu [%]	Energia odzyskana podczas hamowania i przekazana do akumulatora [kWh]	Energia odzyskana podczas hamowania i przekazana do SC [kWh]	Nominalny poziom energii akumulatora [kWh]
1	64,8	100	2,2	19,4	64,9
2	64,8	50	1,6	14,8	64,9
3	64,8	30	1,4	13,0	64,9
4	64,8	10	1,2	11,2	64,9
5	64,8	1	1,2	10,4	64,9
6	72,0	100	2,2	19,5	85,0
7	290,0	100	2,3	20,9	290,0

Lp.	Energia oddana przez akumulator na rozpędzanie pojazdu i jazdę ustalona [kWh]	Suma energii przepływającej przez akumulator - rozpędzanie / jazda ustalona / doładowanie SC / rekuperacja [kWh]	Poziom energii akumulatora po przebiegu trasy testowej z uwzględnieniem doładowania SC i rekuperacji [kWh]	Nominalny poziom energii SC [kWh]	Energia oddawana przez SC na potrzeby rozpędzania pojazdu [kWh]	Energia przyjmowana przez SC na potrzeby "doładowania własnego" [kWh]	Suma energii przepływającej przez SC - rozpędzanie / doładowanie własne SC / rekuperacja [kWh]	Liczba cykli pracy akumulatora na rozpędzanie pojazdu i jazdę ustalona	Liczba cykli pracy akumulatora tylko na potrzeby doładowania SC na postoju i w czasie jazdy ustalonej	Liczba cykli pracy akumulatora tylko na potrzeby odbioru energii podczas hamowania	Liczba cykli pracy akumulatora - rozpędzanie / jazda ustalona / doładowanie SC / rekuperacja	Liczba cykli pracy SC na rozpędzanie pojazdu	Liczba cykli pracy SC na potrzeby "doładowania własnego" podczas postoju i jazdy ustalonej	Liczba cykli pracy SC na potrzeby odzyskiwania energii podczas hamowania
1	30,2	36,9	28,0	3,6	35,5	4,1	59,0	0,233	0,035	0,016	0,284	4,92	0,56	2,69
2	24,5	29,6	35,3	3,6	27,5	3,1	45,4	0,189	0,027	0,013	0,228	3,81	0,43	2,05
3	22,2	26,8	38,0	3,6	24,2	2,9	40,1	0,171	0,024	0,011	0,207	3,36	0,39	1,80
4	19,9	23,9	40,9	3,6	21,0	2,5	34,7	0,154	0,021	0,010	0,185	2,92	0,34	1,55
5	18,9	22,6	42,2	3,6	19,6	2,3	32,3	0,146	0,020	0,009	0,174	2,71	0,32	1,43
6	30,3	36,9	35,1	3,6	35,6	4,1	59,1	0,210	0,031	0,015	0,256	4,94	0,56	2,70
7	32,1	39,0	249,3	3,6	38,2	4,1	63,2	0,056	0,008	0,004	0,068	5,30	0,56	2,90

8. Literatura

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