

ELEKTRYCZNE AUTONOMICZNE JEDNOSTKI TRAKCYJNE NA LINII POMORSKIEJ KOLEI METROPOLITALNEJ?

Streszczenie

Zasobniki energii są instalowane na pokładach elektrycznych pojazdów szynowych głównie w celu odzyskiwania energii hamowania. Postęp technologiczny w zakresie energoelektroniki i magazynowania energii umożliwił wykorzystanie energii elektrycznej do autonomicznej jazdy pojazdów w przypadku awarii sieci trakcyjnej oraz na niezelektryfikowanych odcinkach linii. Zastosowanie te mogą być alternatywą dla sieci trakcyjnej i mają miejsca przede wszystkim w tramwajach i trolejbusach oraz rzadziej w systemach kolejowych. W artykule przedstawiono studium zastosowania zasobnikowej jednostki trakcyjnej na linii Pomorskiej Kolei Metropolitalnej. W ramach studium opracowano model symulacyjny w oprogramowaniu Matlab/Simulink i przeprowadzono w nim przejazd teoretyczny. Na podstawie wyników bilansu energetycznego dobrano zasobnik umożliwiający zasilenie pojazdu na wybranym odcinku PKM.

WSTĘP

Poszukiwania rozwiązań umożliwiających ograniczenie energochłonności transportu szynowego oraz postęp technologiczny w zakresie energoelektroniki i magazynowania energii doprowadziły do hybrydyzacji elektrycznych pojazdów szynowych. Znane są liczne aplikacje innowacyjnych urządzeń do magazynowania energii na pokładach pojazdów [1, 17, 20, 22]. Zasobniki wykorzystywane są głównie do odzyskiwania energii hamowania, jak również umożliwiają autonomiczną jazdę pojazdów w przypadku awarii sieci trakcyjnej oraz na niezelektryfikowanych odcinkach linii [3, 6-9, 11, 16, 19]. Zastosowania te mają miejsca przede wszystkim w tramwajach i trolejbusach, rzadziej w systemach kolejowych, gdzie wymagania w stosunku do zasobników są znacznie większe [4, 12, 14, 15]. Mimo to elektryczne zasobnikowe jednostki trakcyjne funkcjonują na linii Utsunomiya – Karasuyama w Japonii od 2014 roku [13]. W Europie znana aplikacja kolejowa to autonomicznie zasilany elektryczny zespół trakcyjny IPEMU (ang. *Independently Powered Electric Multiple-Unit*), która funkcjonuje w Wielkiej Brytanii [2].

Wykorzystywanie pojazdowych zasobników energii do autonomicznej jazdy pojazdów elektrycznych transportu zbiorowego może być alternatywą dla sieciowej trakcji elektrycznej. Umożliwia podwyższenie efektywności energetycznej pojazdów poprzez wykorzystanie energii hamowania. Rozwijane są pojazdowe źródła energii współpracujące z hybrydowymi zasobnikami energii. Prowadzone są badania nad doładowywaniem zasobników pojazdów na odcinkach trasy lub przystankach [10].

W referacie przedstawiono wyniki studium zastosowania zasobnikowej jednostki trakcyjnej na linii Pomorskiej Kolei Metropolitalnej. W ramach studium opracowano model symulacyjny w oprogramowaniu *Matlab/Simulink* i przeprowadzono w nim przejazd teoretyczny.

1. POMORSKA KOLEJ METROPOLITALNA

Uruchomiona 1 września 2015 r. linia Pomorskiej Kolei Metropolitalnej jest największą inwestycją infrastrukturalną samorządu pomorskiego. Od 1 października 2015 r. prowadzony jest ruch pociągów w relacjach Gdańsk Główny – Gdańsk Port Lotniczy – Gdynia Główna oraz Gdańsk Główny – Gdańsk Port Lotniczy –

Kartuzy, przy czym najwięcej pociągów jeździ na trasie Gdańsk Wrzeszcz – Gdańsk Osowa.

Nowo wybudowany odcinek (linia nr 248) o długości ok. 17 km rozpoczyna się od stacji Gdańsk Wrzeszcz, gdzie linia jest wyprowadzona jako dwutorowa: jeden tor z kierunku od nowego peronu na stacji Gdańsk Wrzeszcz oraz drugi tor estakadą z rejonu starego peronu. Linia PKM odgałęzia się od torów linii nr 202 na wysokości przystanku SKM Gdańsk Zaspą w kierunku ulicy Grunwaldzkiej. Nowe przystanki kolejno od stacji Gdańsk Wrzeszcz to: Strzyża, Niedźwiednik, Brętowo, Jasień, Kiełpinek, Matarnia, Port Lotniczy, Rębiechowo. Pomiędzy przystankiem Port Lotniczy a przystankiem Rębiechowo zlokalizowana jest stacja techniczna z dwoma dodatkowymi torami odstawkowymi. Za przystankiem Rębiechowo linia PKM włącza się w linię 201 w kierunku Kościerzyny (jednotorowa łącznica) i w kierunku Gdyni (dwutorowo). Niezbędna do włączenia linii PKM w linię 201 była przebudowa odcinka linii 201. Na dzień 1 września 2015 r. na całej trasie PKM zelektryfikowany jest tylko odcinek Gdańsk Główny – Gdańsk Wrzeszcz (linia nr 202). Planowana jest elektryfikacja linii nr 201 Gdynia Główna – Kościerzyna, jak również w planach jest elektryfikacja nowo wybudowanego odcinka PKM.

Linia Pomorskiej Kolei Metropolitalnej charakteryzuje się występowaniem dużych pochyłeń podłużnych oraz małych promieni łuków poziomych, na co wpływ miały uwarunkowania terenowe. Najmniejsze promienie łuków poziomych (w zakresie od 390 do 500 m) występują na długim łuku koszowym za stacją Gdańsk Wrzeszcz. Natomiast najdłuższe pochylenie podłużne o znacznej wartości (prawie 27‰) występuje na odcinku pomiędzy przystankiem Gdańsk Kiełpinek a Gdańsk Matarnia, zaś zmiana wysokości sięga 130 m.

Nową linię obsługują spalinowe zespoły trakcyjne wyprodukowane przez PESA Bydgoszcz. Pojazdy dwuczłonowe typu 218Mc mają pojemność 250 osób, natomiast pojazdy trzyczłonowe typu 219M 350 osób. Oba typy pojazdów mogą osiągnąć maksymalną prędkość 120 km/h, a moc zespołu napędowego w każdym z nich wynosi 2 x 390 kW.

2. ANALIZA ENERGETYCZNA

Dla potrzeb analizy energetycznej przejazdów założono, że sieć trakcyjna poza już istniejącym odcinkiem będzie występować

od stacji technicznej na linii nr 248 (pomiędzy przystankiem Gdańsk Port Lotniczy a Gdańsk Rębiechowo) do przystanku Gdańsk Osowa oraz na linii nr 201. Przejazd teoretyczny dla zasobnikowej jednostki trakcyjnej wykonano dla niezelektryfikowanego najbardziej energochłonnego odcinka Gdańsk Wrzeszcz – Gdańsk Port Lotniczy. Dobrano seryjnie produkowany 2-członowy elektryczny zespół trakcyjny. Przy wyborze pojazdu kierowano się podobieństwem do zamówionych pojazdów spalinowych oraz małą wartością masy służbowej.

2.1. Przejazd teoretyczny

Przejazd teoretyczny został przeprowadzony przy wykorzystaniu modelu symulacyjnego zaprojektowanego w programie *Simulink* z pakietu *Matlab*. Obliczenia przeprowadzono dla każdego odcinka jazdy między przystankami w obu kierunkach. Podstawą tych obliczeń było rozwiązanie równań różniczkowych dynamiki pojazdu w trakcie rozruchu, jazdy oraz hamowania:

$$\frac{dv(t)}{dt} = \frac{F - W}{m_z} \quad (1)$$

gdzie:

F – chwilowa wartość siły pociągowej pojazdu [N], wynikająca z warunków ruchu i ograniczeń charakterystyki trakcyjnej pojazdu,
 W – chwilowa wartość całkowitych oporów ruchu pojazdu [N], tj. oporów zasadniczych i dodatkowych,
 m_z – masa zastępcza [kg].

Wynikami przejazdu teoretycznego było wyznaczenie całkowitego czasu i całkowitej drogi przejazdu. Droga obliczana była jako całka z prędkości:

$$s = \int_{t_0}^{t_1} ds = \int_{t_0}^{t_1} v(t) dt \quad (2)$$

gdzie:

s – droga [m],
 v – prędkość [m/s].

Najważniejsze dla całego studium było oszacowanie zapotrzebowania energetycznego ruchu pojazdów. Obliczona została moc pobierana (oddawana w trakcie hamowania) podczas przejazdu:

$$p(t) = F \cdot v(t) \cdot f(r, \eta) \quad (3)$$

gdzie:

$f(r, \eta)$ – funkcja zależna od sprawności przetwarzania energii η i warunków ruchu r (jazda, hamowanie),
 p – moc [W].

Kolejnym obliczanym w symulacji parametrem była energia:

$$E = \int_0^t p(\tau) d\tau \quad (4)$$

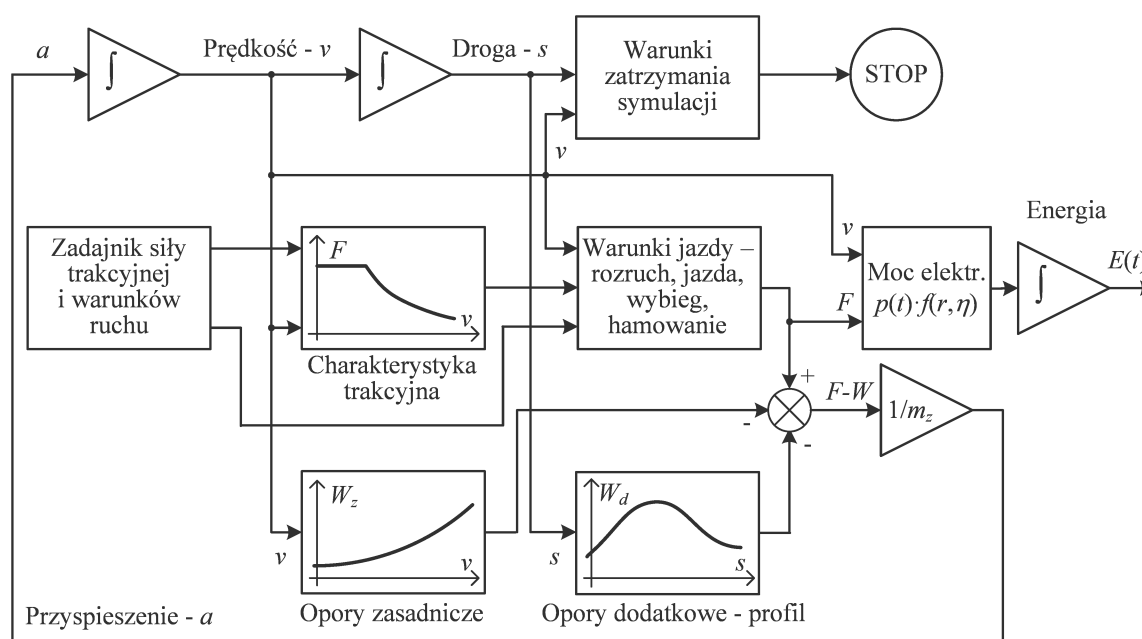
gdzie:

E – energia [J].

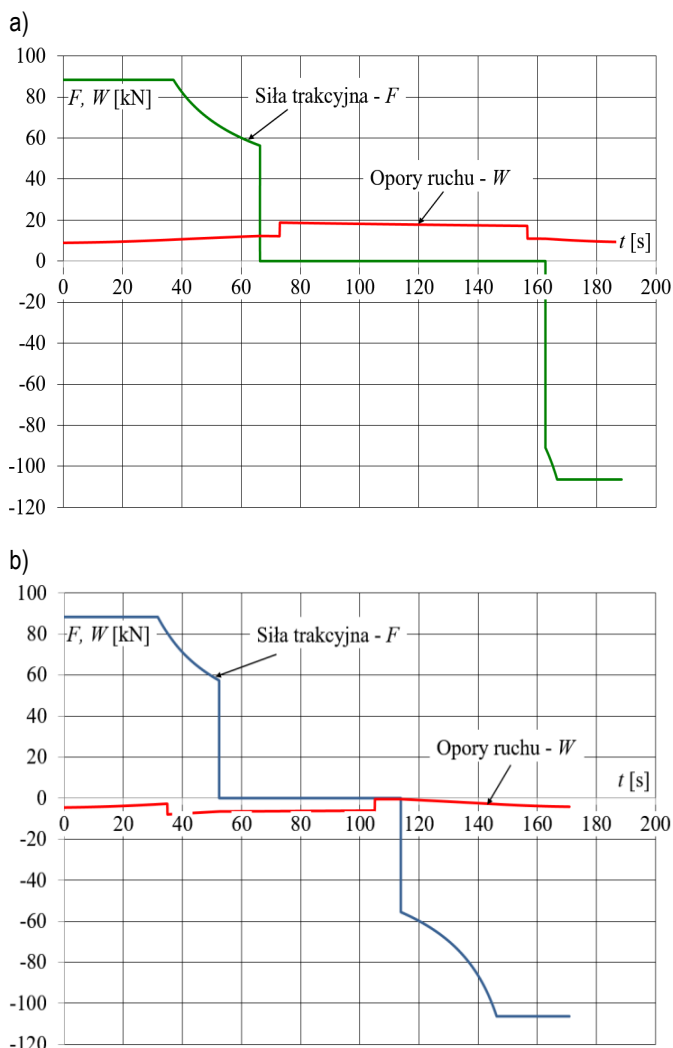
2.2. Komputerowy model symulacyjny

Komputerowy model symulacyjny zaprojektowany w programie *Matlab/Simulink* składa się z wielu podsystemów oraz bloków, w których realizowane są odpowiednie obliczenia oraz wprowadzanie danych. Uproszczony schemat funkcji i działania modelu przedstawiono na rysunku 1. W modelu obliczana jest charakterystyka trakcyjna wybranego pojazdu, zadawane są opory zasadnicze oraz opory dodatkowe w postaci profilu zastępczego. W zależności od charakterystyki pojazdu oraz miejsca, gdzie aktualnie znajduje się pociąg wprowadzone są warunki na jazdę, wybieg oraz hamowanie pociągu. W węźle sumacyjnym od siły pociągowej odejmowane są całkowite opory ruchu. Moc oraz energia, które otrzymujemy na wyjściu obliczane są zgodnie z (3) i (4). Warunki zatrzymania symulacji realizują m.in. możliwość zatrzymania symulacji po przejechaniu odcinka trasy od jednego do drugiego przystanku.

Przykładowe wyniki symulacji na trasie Kiełpiniek – Matarnia i w kierunku przeciwnym przedstawiono na rysunku 2. W cyklu jazdy widoczny jest rozruch, jazda z wybiegu i hamowanie. Ze względu na nachylenie trasy widoczne są duże zmiany oporów ruchu względem obu kierunków jazdy.



Rys. 1. Uproszczony schemat komputerowego modelu symulacyjnego

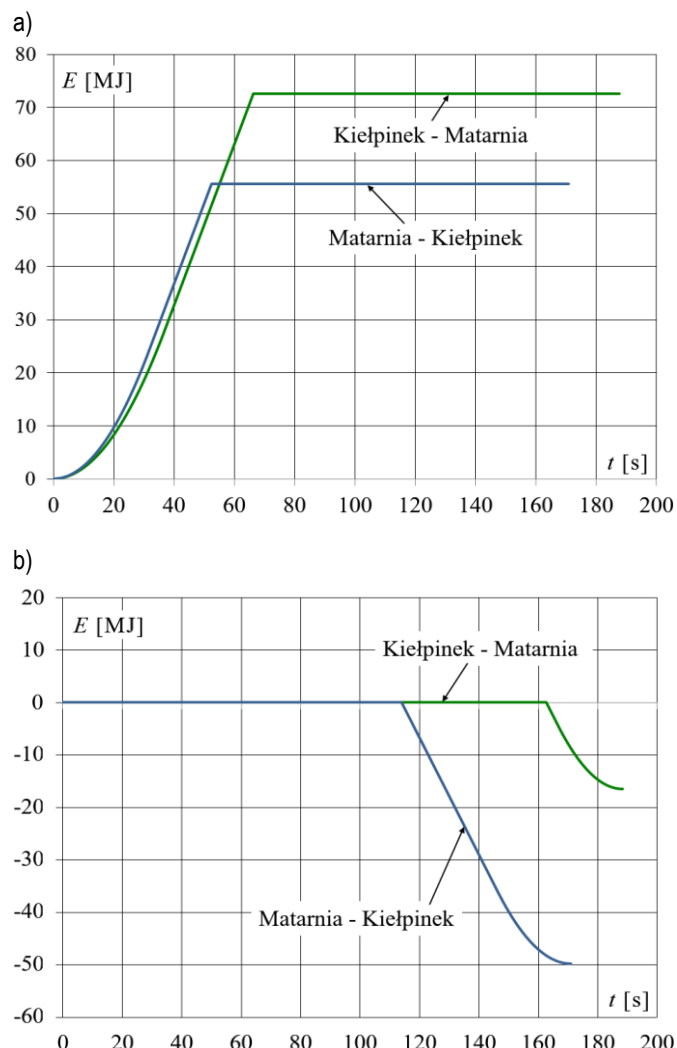


Rys. 2. Przebieg siły trakcyjnej i całkowitych oporów ruchu na odcinku: a) Kiełpinek – Matarnia; b) Matarnia – Kiełpinek

Na rysunku 3 pokazano przebieg zmian energii dla przejazdów na tym samym odcinku w obu kierunkach. W momencie rozruchu energia jest pobierana przez pojazd i używana na pokonanie oporów ruchu, na pokrycie strat w układzie napędowym oraz zasilanie obwodów pomocniczych. Założono, że na straty przeznaczona jest 20% pobieranej energii. Natomiast w momencie hamowania możliwe jest odzyskiwanie energii poprzez zastosowanie hamowania odzyskowego. Dzięki temu można wykorzystać tę energię gromadząc ją w zasobniku. Na trasie Kiełpinek – Matarnia pojazd pobiera energię ponad 70 MJ, natomiast oddaje prawie 20 MJ. Dla przejazdu w kierunku przeciwnym energia pobierana wynosi około 55 MJ, a oddawana prawie 50 MJ. Jest to przykładem specyfiki bilansu energetycznego Pomorskiej Kolei Metropolitalnej.

2.3. Bilans energetyczny

Zebrane wyniki z poszczególnych odcinków dotyczą dwóch przejazdów: Wrzeszcz – Port Lotniczy oraz Port Lotniczy – Wrzeszcz zakładając czas postoju na każdym przystanku 30 s. Jadąc w kierunku Portu Lotniczego zdecydowanie większa część jazdy odbywa się "w górę", natomiast jadąc w kierunku Wrzeszcza jedziemy "w dół". Różnice te widać na rysunkach 4 oraz 5, gdzie na wykresach przedstawiono prędkość w funkcji drogi. Z tego powodu na trasie w kierunku Portu Lotniczego pojazd osiąga mniejsze prędkości. Podczas obu przejazdów nie jest przekraczana prędkość



Rys. 3. Przebieg siły trakcyjnej i całkowitych oporów ruchu na odcinku: a) Kiełpinek – Matarnia; b) Matarnia – Kiełpinek

90 km/h (25 m/s), mimo, że jest to prędkość niższa od zakładanej prędkości maksymalnej (120 km/h). Wynika to z górskiego charakteru trasy, krótkich odległości między przystankami oraz sposobu prowadzenia pojazdu.

Przy przeprowadzaniu przejazdu teoretycznego wprowadzono jazdę na wybiegu, przez co jazda nie była forsowna. Właśnie w tym trybie szczególnie widoczne są różnice występujące przy przejazdach w obu kierunkach. Jadąc z Wrzeszcza pojazd zdecydowanie zwalnia podczas jazdy na wybiegu, natomiast w przeciwnym kierunku momentami przyspiesza. Spowodowane jest to ukształtowaniem terenu. Na tych samych rysunkach można zauważyć również różnice w odległościach między przystankami. Najdłuższy odcinek jest pomiędzy przystankiem Matarnia a Port Lotniczy, następny co do długości jest Kiełpinek – Matarnia, a potem Wrzeszcz – Strzyża. Dlatego na tych odcinkach jazda na wybiegu jest najdłuższa. Inaczej jest w przypadku np. odcinka Niedźwiednik – Brętowo, gdzie odstęp czasowy między końcem przyspieszania a początkiem hamowania jest krótki.

W tabeli 1 przedstawiono bilans energii dla obu kierunków jazdy pociągów. Jadąc w kierunku Portu Lotniczego pojazd pobiera więcej energii oraz oddaje mniej niż w przeciwnym kierunku, co wynika z dodatniego nachylenia trasy w kierunku Portu Lotniczego. Z bilansu energii (tab. 1) wynika, że pojazd w kierunku Portu Lotniczego zużywa ponad trzykrotnie więcej energii niż w kierunku przeciwnym.

Tab. 1. Bilans energii na trasie Wrzeszcz – Port Lotniczy oraz Port Lotniczy – Wrzeszcz

Wrzeszcz – Port Lotniczy	Energia pobrana [kWh]	Energia oddana [kWh]
Wrzeszcz – Strzyża	17,53	7,72
Strzyża – Niedźwiednik	17,64	6,82
Niedźwiednik – Brętowo	17,85	7,83
Brętowo – Jasiień	18,61	6,43
Jasiień – Kiełpinek	16,88	8,18
Kiełpinek – Matarnia	20,15	4,59
Matarnia – Port Lotniczy	18,24	9,39
Suma energii	126,90	50,96
Port Lotniczy – Wrzeszcz	Energia pobrana [kWh]	Energia oddana [kWh]
Port Lotniczy – Matarnia	21,18	11,51
Matarnia – Kiełpinek	15,45	13,83
Kiełpinek – Jasiień	12,46	9,56
Jasiień – Brętowo	12,86	11,20
Brętowo – Niedźwiednik	11,78	10,08
Niedźwiednik – Strzyża	12,79	10,59
Strzyża – Wrzeszcz	14,25	9,56
Suma energii	100,77	76,33

3. STUDIUM DOBORU ZASOBNIKÓW

Wyniki symulacji wpływają na sposób doboru zasobnika energii, który będzie opierał się głównie na trasie w kierunku bardziej wymagającym energetycznie (Wrzeszcz – Port Lotniczy). Z obliczeń wynika, że wymagana jest do tego zgromadzona energia ok. 130 kWh, z czego ok. 50 kWh może być odzyskana. Na trasie powrotnej wymagane jest ok. 101 kWh energii, z czego ok. 76 kWh może być odzyskana. W celu uwzględnienia potrzeb nietrakcyjnych pojazdu (np. sterowanie, oświetlenie, ogrzewanie, klimatyzację) oraz sprawność przetwarzania energii w przekształtnikach i zespołach napędowych przyjęto 120% zwiększenia zapotrzebowania energii z zasobników. Energia akumulatorów z powodu ograni-

czeń czasowych ładowania na niektórych postojach powinna stanowić 50% pojemności znamionowej.

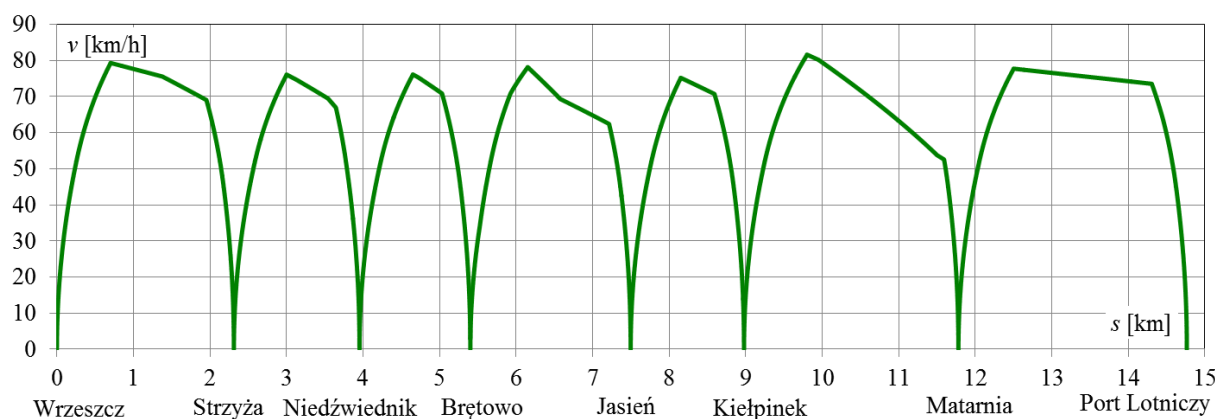
Proponuje się zastosowanie nowoczesnych hybrydowych zasobników:

- bateria akumulatorów trakcyjnych fosforanowo-litowo-magnezowych (LiFeMgPO₄) firmy Valence – jako zasobnik podstawowy,
- superkondensatory – jako zasobnik do przejmowania i oddawania energii w stanach dynamicznych pojazdu (duże prądy rozruchu i hamowania).

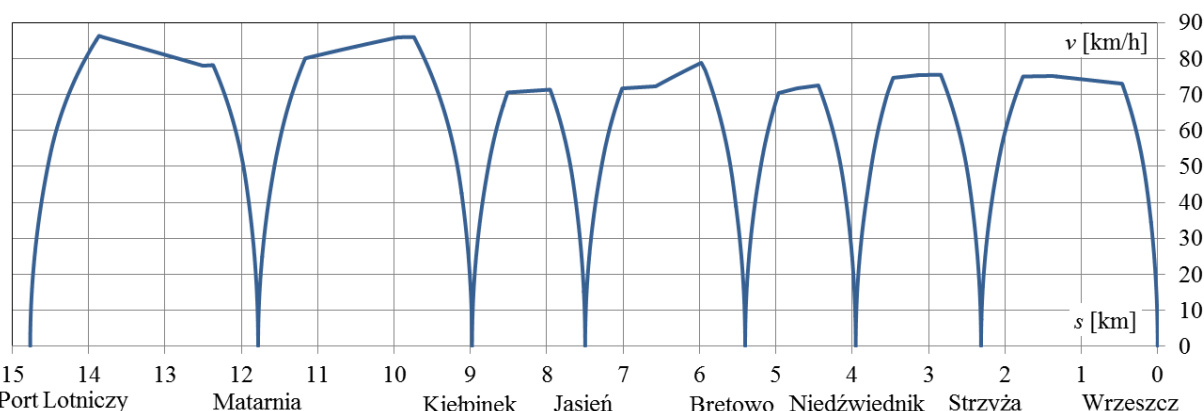
Energię zgromadzoną i oddawaną w superkondensatorach przyjęto na poziomie przynajmniej 50 kWh, w związku z czym 50% energii baterii akumulatorów nie powinna być mniejsza niż 96 kWh. Energia ta powinna być dostępna w ciągu 20 minutowej jazdy na odcinku niezelektryfikowanym. Energia znamionowa baterii akumulatorów powinna zatem wynosić przynajmniej 96 kWh.

Podstawowe parametry wybranej baterii (LiFeMgPO₄) typu U27-36XP to: napięcie znamionowe 38,4 V, pojemność nominalna 46 Ah, masa 19,6 kg, energia właściwa 91 Wh/kg, maksymalny ciągły prąd rozładowywania 90 A oraz maksymalny prąd 30 sekundowy 135 A [21]. Z oszacowania wymaganych prądów i napięć obwodu głównego pojazdu wynika, że należy zastosować ok. 100 sztuk akumulatorów trakcyjnych.

Przyjęta energia zgromadzona i oddawana w superkondensatorach na poziomie 50 kWh będzie wspomagała energię zasobnika akumulatorowego podczas 7 rozruchów pociągu. Pozwala to na założenie, że energia wykorzystywana z superkondensatorów przy 6 rozruchach będzie na poziomie 7 kWh, a przy jednym najbardziej wymagającym na poziomie 8 kWh. Pozwala to na określenie wymaganej maksymalnej mocy chwilowej baterii, która będzie największa podczas rozruchu ze stacji Kiełpinek (w kierunku stacji Port Lotni-



Rys. 4. Prędkość w funkcji drogi dla przejazdu Wrzeszcz – Port Lotniczy



Rys. 5. Prędkość w funkcji drogi dla przejazdu Port Lotniczy – Wrzeszcz

czy) i wynosi 14,58 kWh. Z dalszych szacunków napięć i prądów wynika zapotrzebowanie na zainstalowanie 150 ogniw, które są w stanie dostarczyć moc 810 kW. Dostarczana moc ciągła, określona na podstawie maksymalnego prądu rozładowania, może wynieść 540 kW.

Masa zasobnika wyniesie ok. 3 ton. Uwzględniając przekształtniki, wentylatory i układy pomocnicze masę zasobnika akumulatorowego trzeba przyjąć równą ok. 4 ton.

Do odzyskiwania energii hamowania i wspomaganie przyspieszenia dla poszczególnych odcinków międzyprzystankowych zaproponowano zastosowanie superkondensatorów. Wybrano moduły firmy Maxwell o pojemności znamionowej 94 F, napięciu znamionowym 75 V, maksymalnym napięciu 91 V, masie 25 kg oraz energii właściwej 2,9 Wh/kg [5]. W celu uzyskania odpowiedniego napięcia moduły połączono szeregowo, a w celu uzyskania wymaganej mocy gałęzie te łączy się równolegle. Proponuje się tak utworzony zespół zasobnika włączyć do obwodu głównego pojazdu poprzez dwukierunkowy przekształtnik energoelektroniczny DC/DC. Napęd elektryczny zasilany jest w standardowy sposób poprzez przekształtnik DC/AC [18].

Energia do odzyskania z hamowania dla poszczególnych odcinków międzyprzystankowych wynosi ok. 10 kWh dla jazdy w kierunku Port Lotniczy – Wrzeszcz oraz ok. 7 kWh w przeciwnym kierunku. Energia użyteczna całego zasobnika wyznaczana jest z zależności:

$$E_{uz} = \frac{1}{2} \cdot C_z \cdot (n_s \cdot U_M)^2 \cdot (1 - d^2) \quad (5)$$

gdzie:

E_{uz} – energia zasobnika [J],

C_z – pojemność zastępcza [F],

n_s – liczba modułów w szeregu [szt.],

U_M – maksymalne napięcie modułu [V],

d – współczynnik głębokości rozładowania – 0,5.

Po przeprowadzonych obliczeniach otrzymano zasobnik składający się z prawie 200 jednostek modułowych. Jego energia użyteczna jest równa 10,25 kWh, a masa wynosi prawie 5 ton. Uwzględniając tak jak w przypadku baterii akumulatorów masę przekształtników i osprzętu, należy przyjąć jako masę zasobnika superkondensatorowego ponad 6 ton.

PODSUMOWANIE

Przedstawione wyniki studium pozwalają na stwierdzenie, że istnieje alternatywa dla elektryfikacji linii nr 248 w postaci wykorzystania elektrycznej autonomicznej jednostki z zasobnikiem hybrydowym składającym się z akumulatorów elektrochemicznych i superkondensatorów. Jednostka ta mogłaby być w ten sposób zasilana na odcinku Gdańsk Wrzeszcz – stacja techniczna za Portem Lotniczym. Na pozostałej części trasy pantograf jednostki byłby podniesiony w celu zasilania napędu z sieci trakcyjnej oraz uzupełnienia energii w zasobniku.

Oszacowana masa zasobnika akumulatorowego i superkondensatorowego wskazuje na znaczną różnicę na niekorzyść superkondensatorów. Można wnioskować, że zasobnik akumulatorowy zainstalowany w wybranym pojeździe w mniejszym stopniu pogorszy parametry ruchowe niż zasobnik superkondensatorowy, którego masa obniża dynamikę pojazdu – zasobnik ten wymaga znaczącej dodatkowej przestrzeni. Celowe jest wykonanie dalszych badań w celu sprawdzenia jak wpłynie to na dynamikę pojazdu oraz jakie parametry ruchowe oraz masę zasobnika elektrochemicznego

można osiągnąć przy zmniejszonej masie zasobnika superkondensatorowego. Wydaje się jednak, że wykorzystanie elektrycznych autonomicznych jednostek trakcyjnych może być przyszłością dla krótkich odcinków kolei miejskich przewidzianych do elektryfikacji.

BIBLIOGRAFIA

1. Arbolea P., Cotoa M., González-Morán C., Arregui R., On board accumulator model for power flow studies in DC traction networks. *Electric Power Systems Research* 116, 2014.
2. Batteries included: Prototype battery-powered train carries passengers for first time, <http://www.railmagazine.com/trains/new-trains/batteries-included>
3. Ceraolo M., Giglioli R., Lutzemberger G., Bechini A., Cost effective storage for energy saving in feeding systems of tramways. *Electric Vehicle Conference (IEVC), IEEE International* 2014.
4. Ceraolo M., Lutzemberger G., Stationary and on-board storage systems to enhance energy and cost efficiency of tramways. *Journal of Power Sources* 264, 2014.
5. Datasheet 75V Module, http://www.maxwell.com/images/documents/datasheet_75v_module.pdf
6. De la Torre S.; Sanchez-Racero A. J., Aguado J. A., Reyes M., Martiane O., Optimal Sizing of Energy Storage for Regenerative Braking in Electric Railway Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 30, No. 3, May 2015.
7. Del Pizzo, A.; Fratelli, L.; Perna, D.; Nappo, C., A method for “design to range” energy storage systems in catenary free operations of light railway vehicles. *Clean Electrical Power (ICCEP), 2015 International Conference on*, 2015.
8. Hayashiya H., Hara D., Tojo M., Watanabe K., Hino M., Suzuki T., Okamoto H., Takahashi H., Kato T., Teshima M., Lithium-ion battery installation in traction power supply system for regenerative energy utilization. Initial report of effect evaluation after half a year operation. *16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC) Antalya, Turkey* 21-24 Sept 2014.
9. Hayashiya H., Suzuki T., Kawahara K., Yamanoi T., Comparative study of investment and efficiency to reduce energy consumption in traction power supply. A present situation of regenerative energy utilization by energy storage system. *16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition Antalya, Turkey* 21-24 Sept 2014.
10. Judek S., Karwowski K., Supply of electric vehicles via magnetically coupled air coils. *13th. Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2008*.
11. Krawczyk G.: Akumulacja energii w transporcie szynowym, *Logistyka* 3/2012.
12. López-López Á. J., Pecharrómán R. R., Fernández-Cardador A., Cucala A. P., Assessment of energy-saving techniques in direct-current-electrified mass transit systems. *Transportation Research Part C* 38, 2014.
13. Kolej JR East rozpoczyna eksploatację zespołu trakcyjnego napędzanego akumulatorami, *Technika Transportu Szynowego*, nr 4, 2014.
14. Maciolek T., Drażek Z., Szelaż A., Efektywność energetyczna zasobników energii w podstacjach systemu prądu stałego 3 kV DC. *Logistyka* 4/2015.
15. Okui A., Hase S., Shigeeda H., Konishi T., Yoshi T., Application of Energy Storage System for Railway Transportation in Japan. *The International Power Electronics Conference*, 2010.
16. Pawelczyk M.: Rozwój systemów wykorzystujących akumulację energii w transporcie szynowym, *Pojazdy Szynowe* nr 2/2011.

17. Ratniyomchai T., Hillmansen S., Tricoli P., Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways. IET Electr. Syst. Transp., Vol. 4, Iss. 1, 2014.
18. Rufer A., Energy Storage for Railway Systems, Energy Recovery and Vehicle Autonomy in Europe. The International Power Electronics Conference (IPEC), 2010.
19. Szeląg A.: Efektywność hamowania odzyskowego w zelektryfikowanym transporcie szynowym, Pojazdy Szynowe nr 4/2009.
20. Tsukahara K., Kondo K., A Study on Methods to Design and Select Energy Storage Devices for Fuel Cell Hybrid Powered Railway Vehicles. Industrial Electronics Society, IECON - 39th Annual Conference of the IEEE, 2013.
21. Ucharge XP Datasheet Nov 2014, <http://www.valence.com/resources/>
22. Zhu Guiping, Xia Mingchao, Wang Siyu, Hybrid Power Supply System of Rail Transit Based on On-board Energy Storage Equipment. 2014 International Conference on Power System Technology (POWERCON 2014) Chengdu, 20-22 Oct. 2014.

BATTERY ELECTRIC MULTIPLE UNIT ON POMERANIAN METROPOLITAN RAILWAY?

Abstract

Energy storage devices are installed on-board of vehicles mainly for the purpose of recovering energy during braking. Technological progress in power electronics and energy storage made using energy for autonomous drive in case of power shortage and on unelectrified railways sections possible. Those applications can provide alternative for overhead catenary system and can be used mainly in trams, trolleybuses and less often in railway systems. This paper explores the possibility of application of on-board energy storage devices in Pomeranian Metropolitan Railway (PKM) trains. To achieve that the simulation model in Matlab/ Simulink was designed and theoretical drive was simulated therein. Basing on the results of energy balance the energy storage devices enabling powering the vehicle on selected PKM section were selected.

Autorzy:

mgr inż. **Natalia Karkosińska-Brzozowska** – Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Transportu Szynowego i Mostów; 80-233 Gdańsk; ul. G. Narutowicza 11/12. Tel: +48 58 347-14-19. e-mail: natalia.brzozowska@pg.gda.pl

dr hab. inż. **Krzysztof Karwowski**, prof. nadzw. PG – Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Inżynierii Elektrycznej Transportu; 80-233 Gdańsk; ul. G. Narutowicza 11/12. Tel: +48 58 347-11-58. e-mail: krzysztof.karwowski@pg.gda.pl