

Rozwiązania poprawiające efektywność energetyczną kolei na podstawie testów przeprowadzonych w Wielkiej Brytanii

Streszczenie. Z uwagi na ciągły i zmienny ruch pociągów trakcja kolejowa narażona jest na znaczne wahania obciążeń. W artykule przedstawione są problemy wynikające ze specyficznych warunków pracy urządzeń trakcyjnych. Autor omawia następnie rozwiązania pozwalające na ograniczenie lub całkowite zniwelowanie wielu z nich poprzez wykorzystanie potencjału, jaki daje rekuperacja, czyli hamowanie z odzyskiem energii elektrycznej. W kolejnej części omówione zostały testy przeprowadzone w Wielkiej Brytanii z wykorzystaniem baterii akumulatorów do samodzielnego zasilania pociągu na krótkich odcinkach. Na podstawie wyników testów zaprezentowana jest autorska analiza wpływu dodatkowej masy baterii akumulatorów na zużycie energii elektrycznej, jak i na czas przejazdu na wybranych odcinkach kolejowych. Następnie przedstawione zostają możliwości płynące z zarządzania energią z wykorzystaniem baterii akumulatorów w połączeniu z systemem GPS.

Abstract. The traction electrification system is subject to dynamically changing and moving loads caused by the moving trains. This article talks about problems arising from such specific working regimes that the traction equipment is exposed to. Author then outlines ways of reducing or at least partial solving of many of those problems by using the regenerative braking. The following part of this article presents outcomes of the tests undertaken by Network Rail in East Anglia region of Great Britain where the electric train independently powered by batteries was running on circa 70 km long section of the route. Based on the results of these tests author analyses the effect of the additional mass of the battery rafts on the train's total energy consumption and journey time on chosen routes. At the end of the article author talks about the key potential benefits of the smart energy management using the on-board energy storage devices together with the GPS system. (Solutions Improving Energy Efficiency of the Traction Electrification Systems Based on Tests Undertaken in Great Britain)

Słowa kluczowe: energia, kolej, rekuperacja, trakcja elektryczna.

Keywords: energy, railway, regenerative braking, electrical traction.

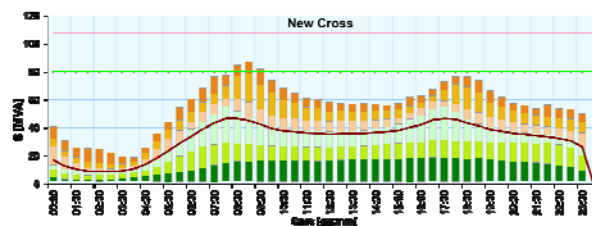
Specyfika energetyczna kolei – wyzwania

Znaczące zapotrzebowanie na energię elektryczną

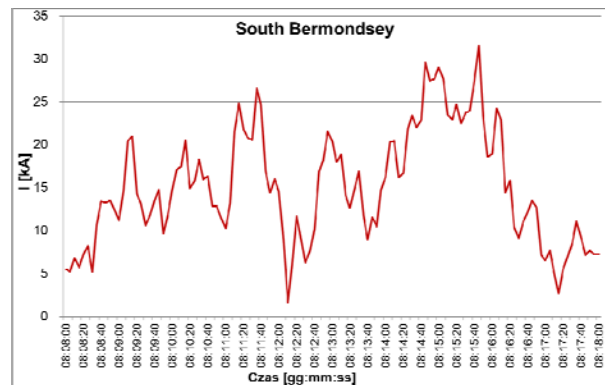
W krajach uprzemysłowionych kolej zelektryfikowana stanowi znaczący udział w całkowitym zapotrzebowaniu na energię elektryczną. Odnosząc się do Wielkiej Brytanii – roczny pobór energii elektrycznej na potrzeby transportu kolejowego w 2015 roku wyniósł 3,4 TWh, co wiązało się z emisją około $1,75 \cdot 10^6$ ton CO_2 ¹, w tym 1,4 TWh i około $0,72 \cdot 10^6$ ton CO_2 przypadło na kolej w południowym rejonie Wielkiej Brytanii zasilaną napięciem stałym.

Zmienność obciążeń

Kolej ze względu na swoją specyfikę – ruch pociągów – charakteryzuje się znaczną zmiennością obciążeń w zakresie całodobowym (zobrazowane jest to na przykładzie punktu zasilającego New Cross – rysunek 1), lecz przede wszystkim w zakresie chwilowym. Na największych podstacjach transformatorowo-prostownikowych zmiany chwilowe obciążeń niejednokrotnie osiągają wartości kilkunastu kiloamper, porównywalne z wartościami prądów zwarciovych, co zobrazowane jest na przykładzie podstacji transformatorowo-prostownikowej South Bermondsey (rysunek 2). Tak duża zmienność obciążeń stwarza konieczność doboru transformatorów zasilających do szczytowych wartości średnich półgodzinnych zapotrzebowań na moc, układów transformatorowo-prostownikowych zaś o odpowiednio wysokich mocach znamionowych dopuszczających znaczne przeciążenia chwilowe. Odnosi się to również do pozostałych elementów systemu zasilającego i trakcyjnego (kable, linii napowietrznych, linii trakcyjnych, zabezpieczeń przeciążeniowych i zwarciovych itd.). Duża zmienność obciążeń przekłada się zatem na znaczne koszty takich urządzeń i całego systemu.



Rys.1. Wykres zmienności całodobowej zapotrzebowania na moc dla głównego punktu zasilającego New Cross w rejonie Londynu²



Rys.2. Zmienność chwilowa prądu podstacji transformatorowo-prostownikowej South Bermondsey zasilającej trakcję prądu stałego³

Zmienność obciążeń wywołuje znaczne wahania napięcie sieci trakcyjnej. Nie bez przyczyny zatem układy trakcyjne pociągów muszą być przystosowane do działania w szerokim zakresie napięć.

W Wielkiej Brytanii są to odpowiednio:

- 17,5 – 29 kV dla sieci trakcyjnych prądu przemiennego o nominalnym napięciu 25 kV;

¹ Obliczono z wykorzystaniem kalkulatora na stronie <http://www.carbon-calculator.org.uk>

² "New Cross - Tess Data – 2010", Network Rail, Wielka Brytania

³ Na podstawie wyników symulacji przeprowadzonych w programie Vision/OSLO dla rozkładu jazdy pociągów z 2015 roku

▪ 400 – 900 V dla sieci trakcyjnych prądu stałego o nominalnym napięciu 750 V.

Poza szczególnymi wymaganiami związanymi z doбором mocy urządzeń trakcyjnych infrastruktura musi zatem sprostać wyjątkowo szerokim zakresom zmian obciążeń i napięć. Te dwa ostatnie czynniki są niejednokrotnie przyczyną wielu awarii. Awarie urządzeń trakcyjnych mogą mieć zakres lokalny – w przypadku awarii np. kabla trakcyjnego, czy zabezpieczenia przeciążeniowego, niejednokrotnie jednak mają zakres znacznie bardziej rozległy – w przypadku np. awarii układu transformator-prostownik, lub transformatorów zasilających GPZ. Takie awarie, o ile nie prowadzą do całkowitej utraty zasilania długich odcinków trakcyjnych, często w znacznym zakresie pogarszają ich parametry obciążeniowo-napięciowe. Konsekwencje awarii to między innymi: konieczność znacznego ograniczenia ruchu pociągów, ograniczenia prędkości – opóźnienia, lub konieczność całkowitego wyłączenia odcinka z ruchu pociągów.

Znaczne chwilowe obciążenia sieci trakcyjnych w miejscach o słabszych parametrach sieciowych (większe odległości między kolejnymi punktami zasilającymi, mniejsze przekroje linii napowietrznych lub szyn napięciowych w przypadku systemów zasilania z trzeciej szyny) powodują duże spadki napięć, niejednokrotnie do wartości, które znacząco obniżają moce napędowe układów trakcyjnych pociągów. W takich przypadkach niejednokrotnie poprawia się parametry zasilania sieci trakcyjnej, instalując dodatkowe kabiny sekcyjne bądź dodatkowe układy zasilające transformator-prostownik, a nawet transformatory sieciowe dużych mocy. Z uwagi na konieczność utrzymywania dobrych parametrów napięciowych instalacja dodatkowych urządzeń prowadzi często do tego, iż pracują one przez zdecydowaną większość czasu przy obciążeniach nieprzekraczających 20-30% ich mocy nominalnej.

Wszystkie wymienione wyżej czynniki sprawiają, iż zarówno koszty budowy infrastruktury elektrycznej trakcji kolejowej, jej utrzymanie, jak i modernizacja wiąże się z bardzo wysokimi kosztami. Przekłada się to również na ceny biletów kolejowych.

Wysokie koszty sprawiają także, iż w zdecydowanej większości przypadków budowa i modernizacja infrastruktury elektrycznej trakcji kolejowej jest dopasowana jedynie do bieżących potrzeb, pozostawiając niewielki margines do wprowadzania zmian zarówno w taborze kolejowym, jak i do zwiększania częstotliwości połączeń.

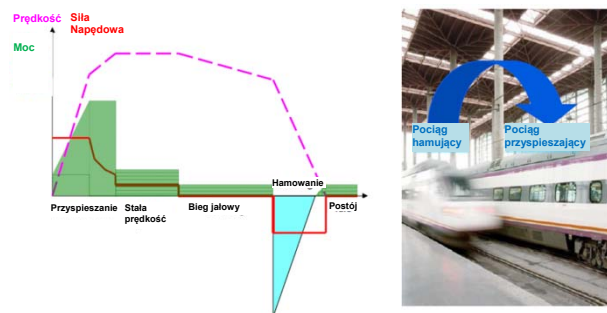
A to jedynie niektóre z wyzwań, z którymi na co dzień musi zmagać się kolej.

Rekuperacja

Wyzwania jednak stwarzają grunt pod innowacje. Jedną z istotnych w ostatnich latach i stale zyskującą na znaczeniu jest rekuperacja – hamowanie z odzyskiem energii elektrycznej. Energia kinetyczna rozpędzonej masy pociągu zamieniana jest na energię elektryczną dzięki przestawieniu pracy silników trakcyjnych pociągu na pracę generatorową. Poniższy rysunek obrazuje przykładowy przebieg prądu obciążenia pociągu z hamowaniem rekuperacyjnym.

Szacuje się, że potencjał energetyczny rekuperacji to 20 – 40% całkowitego zapotrzebowania na energię elektryczną pociągów. W praktyce jednak w trakcjach prądu stałego znacząca część tego potencjału nie jest wykorzystywana. Wynika to przede wszystkim z faktu, iż do hamowania rekuperacyjnego niezbędny jest potencjalny odbiorca tej energii elektrycznej, o zapotrzebowaniu co najmniej równym wartości chwilowej mocy rekuperacji i usytuowany stosunkowo blisko źródła tejże energii – najlepiej w obrębie

kilkuset metrów. Wymóg ten w praktyce często nie może być spełniony w pełni lub nie jest spełniany wcale. Uproszczona nieco relacja jest zatem taka, że im większe jest natężenie ruchu pociągów, tym większe jest procentowe wykorzystanie potencjału energetycznego wynikającego z rekuperacji. W pozostałych przypadkach napięcie na zaciskach pociągu rośnie skokowo do wartości przekraczających dopuszczalne i automatyka pociągu ze względów bezpieczeństwa wyłącza hamowanie rekuperacyjne i przestawia pociąg na klasyczny rodzaj hamowania, co powoduje zamianę energii kinetycznej pojazdu na energię cieplną, rozpraszaną w otoczeniu.



Rys.3. Przykładowy wykres przebiegu obciążenia pociągu z hamowaniem rekuperacyjnym oraz poglądowa wizualizacja sytuacji, w której pociąg hamujący z rekuperacją zasila pociąg ruszający ze stacji.

Trakcyjne zasobniki energii

Jednym z rozwiązań opisanego wyżej problemu jest przechwytywanie energii z rekuperacji i jej magazynowanie w zasobnikach trakcyjnych instalowanych zwykle na podstawach transformatorowo-prostownikowych. Mimo iż zasobniki trakcyjne nie są tematem niniejszej publikacji, warto o nich wspomnieć. Obecnie stosowane i testowane są trzy rodzaje rozwiązań: koła zamachowe, superkondensatory oraz zasobniki akumulatorowe. Najczęściej zastosowanie znajdują zasobniki akumulatorowe. Szczególnie intensywnie technologia ta rozwija się w Japonii. Jako przykład można podać instalacje na liniach kolejowych w: Tokio (linie kolejowe oraz linie metra), Okinawie, Kiusiu, Tobu, czy Hiroszimie. Zasobniki o mocach od 500 kW do 2,5 MW w zależności od lokalizacji i potrzeb realizują szereg zadań – od zmniejszenia zużycia energii elektrycznej, przez ograniczanie maksymalnych mocy chwilowych i stabilizację napięcia, po zasilanie awaryjne.⁴

Zasobniki akumulatorowe zostały także zainstalowane w Stanach Zjednoczonych w Filadelfii na linii Market Frankford. Moduły o mocy 2,2 MW znacząco ograniczyły maksymalne obciążenia chwilowe podstawy, a także pozwoliły uzyskać około 12% spadek rocznego zapotrzebowania na energię elektryczną.

Podobne rozwiązanie zostało wprowadzone na Warszawskiej II linii metra. Na stacji Stadion Narodowy zainstalowano, oparty na dwuwarstwowych superkondensatorach, największy tego rodzaju na świecie układ magazynowania energii (Environline ESS). 40-megadżulowy system pozwala zmniejszyć koszty operacyjne przy jednoczesnym zwiększeniu poziomu efektywności energetycznej.⁵

⁴ Toshiba, „TESS Presentation_2018_June_Rev0”, Japan, June 2018 [11];

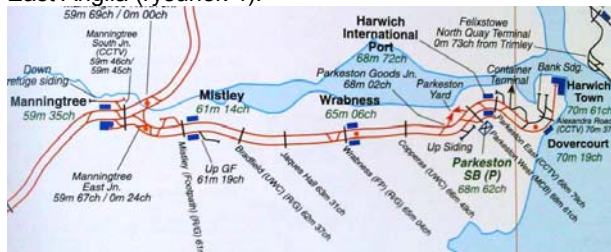
<http://www.toshiba.co.jp/sis/railwaysystem/en/products/power/teess.htm> [12]

⁵ <http://www.abb.pl> [13]

Wśród wielu zalet, rozwiązania te cechuje jedno podstawowe ograniczenie – mogą być stosowane jedynie lokalnie, co sprawia, iż nie pozwalają na przechwytywanie energii z rekuperacji na całej trasie przejazdu pociągu.

Zasobniki energii na pokładzie pociągu

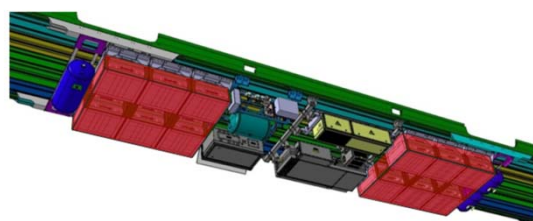
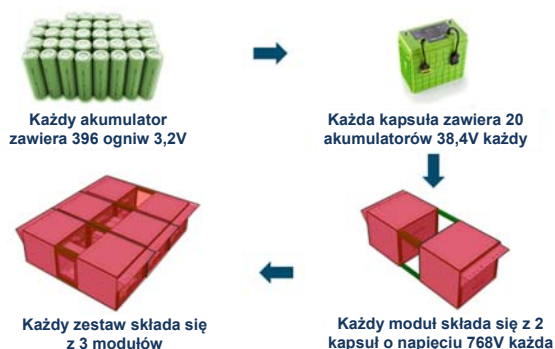
Rozwiązaniem umożliwiającym przechwytywanie energii z rekuperacji na całej trasie przejazdu pociągu jest zastosowanie zasobników energii bezpośrednio na pokładzie pociągu np. w postaci baterii akumulatorów. Pociąg z takimi zasobnikami energii był testowany w Wielkiej Brytanii na trasie Manningtree – Harwich w rejonie East Anglia (rysunek 4).



Rys.4. Mapa trasy kolejowej pomiędzy miejscowościami Manningtree i Harwich w rejonie Wschodniej Anglii

W pociągu klasy 378 firmy Bombardier zastosowano moduły baterii akumulatorów Litowo-Żelazowo-Fosforanowe. Rysunek 5 obrazuje sposób łączenia poszczególnych ogniw do ostatecznej postaci modułu.

Zestaw baterii akumulatorów



Pojemność zestawu: 550 Ah, 768 V
425 kWh
95040 ogniw

Rys.5. Sposób grupowania i umiejscowienie modułów baterii akumulatorów Litowo-Żelazowo-Fosforanowych⁶

Moduły te łącznie zwiększyły masę 4-wagonowego pociągu o 5 ton, ze 180 do 185 ton.

W Polsce bardzo prężnie technologia ta rozwija się przede wszystkim w pojazdach tramwajowych.

Bydgoska Pesa w swoich pojazdach tramwajowych z rodziny Jazz wprowadziła układ napędowy umożliwiający odzyskiwanie energii elektrycznej z hamowania elektrodynamicznego. Energia ta gromadzona jest w superkondensatorach, co obniża koszty eksploatacji. Rozwiązanie to umożliwia także zjazd tramwaju przy zasilaniu z baterii akumulatorów celem np. awaryjnego zjazdu ze skrzyżowania przy braku zaniku zasilania z sieci trakcyjnej. Tramwaje z zasobnikami magazynującymi energię elektryczną z rekuperacji kursują już np. w Warszawie.⁷

Podobne rozwiązanie wprowadził Bolechowski Solaris w tramwajach z rodziny Tramino. Zastosowanie superkondensatorów pozwala na magazynowanie energii pochodzącej z procesu rekuperacji, która następnie wykorzystywana jest do ruszania pojazdu.⁸

Analiza wpływu dodatkowego ciężaru modułów baterii akumulatorów na pobór energii elektrycznej

Pierwotnym celem testów przeprowadzonych na odcinku Manningtree do Harwich nie było zwiększenie wykorzystania energii z rekuperacji, lecz zbadanie możliwości jazdy bez zasilania z sieci trakcyjnej, jedynie z modułów baterii akumulatorów na odcinkach niezelektryfikowanych. Niejako efektem ubocznym okazała się możliwość pełnego przechwytywania energii z rekuperacji. Korzyści energetyczne płynące z możliwości pełnego przechwycenia i ponownego wykorzystania energii z rekuperacji są znaczące, warto jednak przeanalizować sam wpływ dodatkowego ciężaru modułów baterii akumulatorów na całkowite zużycie energii elektrycznej przez pociąg. W tym celu w programie Vision/OSLO przeprowadzono symulacje z udziałem 4-wagonowego pociągu klasy 378 w wersji bez modułów baterii akumulatorów oraz w wersji z zainstalowanymi modułami. Analizy przeprowadzono na odcinku Cambridge do Kings Lynn (również w rejonie Wschodniej Anglii) i w kierunku powrotnym dla dwóch wariantów: pociągu bez pasażerów; oraz pociągu w pełni zapelnionego pasażerami.

Tabela 1. Porównanie całkowitego poboru energii elektrycznej i czasów przejazdu dla pociągów bez i z zainstalowanymi modułami baterii akumulatorów – na podstawie symulacji przeprowadzonych w programie Vision/OSLO

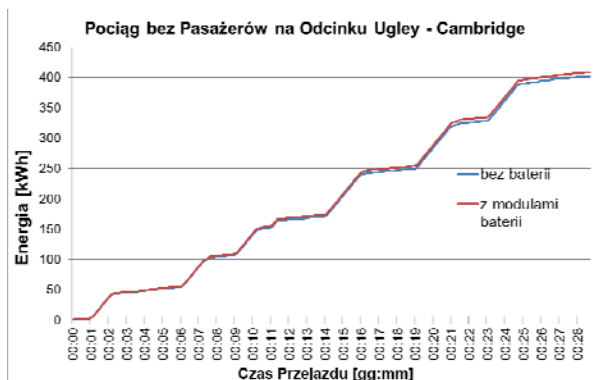
Trasa	Rodzaj i Masa Pociągu	Czas przejazdu [gg:mm:ss]	Pobór energii elektrycznej [kWh]
Ugley – Cambridge	Bez baterii, bez pasażerów – 180 ton	00:27:40	401,5
Ugley – Cambridge	Z bateriami, bez pasażerów – 185 ton	00:27:45	408,1
Kings Lynn – Ugley	Bez baterii, bez pasażerów – 180 ton	01:08:00	890,7
Kings Lynn – Ugley	Z bateriami, bez pasażerów – 185 ton	01:08:00	904,4
Ugley – Cambridge	Bez baterii, z pasażerami – 224 tony	00:28:00	460,3
Ugley – Cambridge	Z bateriami, z pasażerami – 229 ton	00:28:05	466,8
Kings Lynn – Ugley	Bez baterii, z pasażerami – 224 tony	01:08:10	1002,5
Kings Lynn – Ugley	Z bateriami, z pasażerami	01:08:15	1016,6

⁶ Rory Dickerson, "20150715 IPEMU ATOC – Independently Powered Electric Multiple Unit", presentation, Network Rail, UK, July 2015 [3]

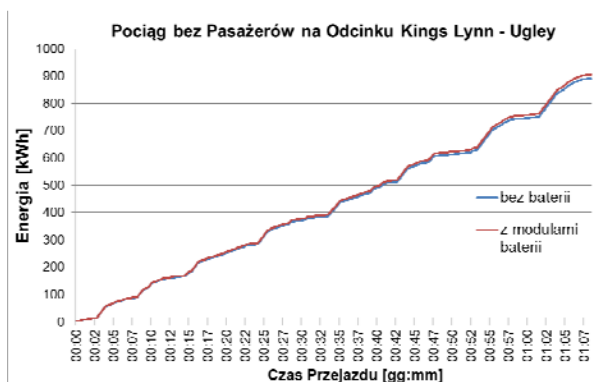
⁷ <http://www.pesa.pl> [16]

⁸ <https://www.solarisbus.com> [17]

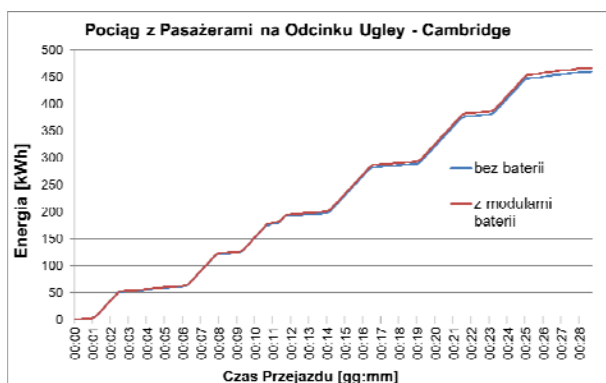
W przypadku obu pociągów możliwość rekuperacji została wyłączona, tak by uzyskać jedynie dodatkowy wydatek energetyczny konieczny do przetransportowania w tym samym czasie dodatkowej masy modułów baterii akumulatorów. Wyniki symulacji przedstawione są w poniższej tabeli i na wykresach.⁹



Rys.6. Wpływ dodatkowej masy baterii akumulatorów na przebieg poboru energii elektrycznej pociągu 4-wagonowego klasy 378 firmy Bombardier bez pasażerów na odcinku Ugly – Cambridge



Rys.7. Wpływ dodatkowej masy baterii akumulatorów na przebieg poboru energii elektrycznej pociągu 4-wagonowego klasy 378 firmy Bombardier bez pasażerów na odcinku Kings Lynn – Ugly

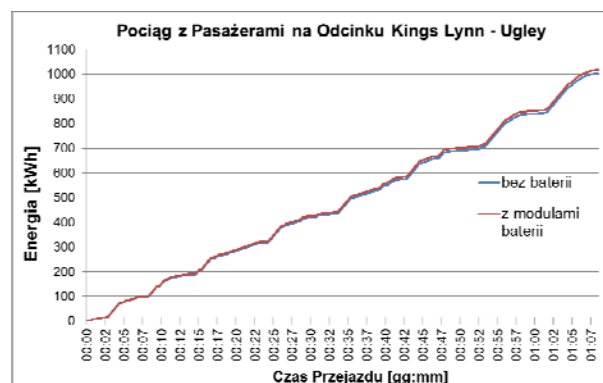


Rys.8. Wpływ dodatkowej masy baterii akumulatorów na przebieg poboru energii elektrycznej pociągu 4-wagonowego klasy 378 firmy Bombardier z pasażerami na odcinku Ugly – Cambridge

Z powyższych analiz wynika, iż wpływ dodatkowej masy modułów baterii akumulatorów na całkowite zapotrzebowanie na energię elektryczną jest znikomy – rzędu 1-2%.¹⁰

Testy przeprowadzone w 2013 roku były jedynie pierwszą próbą, należy zatem przyjąć, iż postępujący

rozwój technologii ogniw w przyszłości zaowocuje rozwiązaniami lepszymi, o większej sprawności energetycznej i wydajności.



Rys.9. Wpływ dodatkowej masy baterii akumulatorów na przebieg poboru energii elektrycznej pociągu 4-wagonowego klasy 378 firmy Bombardier z pasażerami na odcinku Kings Lynn – Ugly

Korzyści z zastosowania modułów baterii akumulatorów i zarządzania zasobami energii z wykorzystaniem systemu GPS

Możliwości, jakie otwierają się dzięki połączeniu obu rozwiązań, tzn. instalacji modułów baterii akumulatorowych i komunikacji GPS mogą być ogromne.

Po pierwsze z samego zastosowania modułów baterii akumulatorowych zdolnych przechwytywać i gromadzić energię z rekuperacji uzyskać można niemal pełne wykorzystanie jej potencjału. W zależności od lokalizacji przekładało się to na zmniejszenie całkowitego poboru energii elektrycznej o 20–40%.¹¹ Przykładowo w południowym rejonie Wielkiej Brytanii zasilanym napięciem stałym mogłoby to prowadzić do zmniejszenia zużycia energii elektrycznej na potrzeby kolei o 280 do 560 GWh rocznie, co wiązałoby się ze zmniejszeniem emisji CO₂ o około 150 do 300·10³ ton rocznie.¹² Dodatkowo przechwytywanie i ponowne bezpośrednie wykorzystanie energii z rekuperacji na potrzeby ruchu i potrzeby własne pociągu pozwalałoby na pominięcie strat energii elektrycznej związanych z przepływem prądu w sieci trakcyjnej.

Zastosowanie natomiast dodatkowo systemu GPS do zarządzania zasobami energii zgromadzonej w bateriach akumulatorów otworzyłoby szereg kolejnych możliwości.

Z punktu widzenia sieci trakcyjnej odpowiednie zarządzanie zasobami energii z rekuperacji, przykładowo większe jej wykorzystanie w godzinach szczytu, mogłoby znacznie ograniczyć wartości szczytowe poborów mocy i doprowadzić do wygładzenia dobowych charakterystyk zapotrzebowania na moc zarówno stacji transformatorowo-prostownikowych, jak i głównych transformatorów sieciowych. Korzyści płynące z takiego zarządzania energią to wydłużenie życia kluczowych elementów systemu zasilania trakcji kolejowej, zwiększone możliwości wprowadzania dodatkowych pociągów, lub wydłużania składów. Na odcinkach elektryfikowanych stwarzałoby to także możliwość instalacji urządzeń o mniejszych mocach znamionowych i obniżonych wymogach przeciążeniowych,

¹¹ Podawane w polskiej literaturze wielkości zmniejszenia zużycia energii dla tramwajów z rekuperacją i zasobnikami energii elektrycznej – np. z pomiarów w tramwajach Warszawskich – wskazują na wartości rzędu 30 – 33%. A. Szeląg, Z. Drążek, T. Maciołek, "Elektroenergetyka miejskiej trakcji elektrycznej", Wyd. Spatium, Radom, 2017 [4]

¹² Obliczono z wykorzystaniem kalkulatora na stronie <http://www.carbon-calculator.org.uk>

⁹ Na podstawie analiz własnych

¹⁰ Analiza i opracowanie własne

co w efekcie pozwoliłoby na znaczne zmniejszenie kosztów budowy elektrycznej trakcji kolejowej. Znaczne korzyści odczułyby również zasilające kolej sieci wysokiego napięcia.

Innym zastosowaniem, testowanym także w ramach projektu IPEMU, byłaby możliwość jazdy taborów elektrycznych na odcinkach niezelektryfikowanych, co ograniczyłoby emisję szkodliwych spalin i pozwoliło na dodatkowe oszczędności związane z ewentualną elektryfikacją tych odcinków.

W miejscach newralgicznych obciążeniowo i napięciowo, w których jakiegokolwiek zwiększenie ruchu pociągów byłoby niemożliwe, wykorzystanie potencjału z rekuperacji pozwoliłoby na wprowadzenie dodatkowych pociągów bez konieczności inwestycji w infrastrukturę sieci trakcyjnej.

W przypadku tak niepożądanych awarii elektrycznej trakcji kolejowej, które niejednokrotnie prowadzą do ograniczenia, lub całkowitego wyłączenia ruchu pociągów na długich odcinkach, wykorzystanie energii zgromadzonej w modułach baterii akumulatorów umożliwiłoby utrzymanie ruchu pociągów.

Zasilanie pociągów z modułów baterii akumulatorowych pozwoliłoby także na znaczne ograniczenie spadków i wahań napięć w sieci trakcyjnej. Korzyści z tego płynące to przede wszystkim mniejsze zużycie elementów sieci trakcyjnej, czego efektem byłoby zmniejszenie ilości i częstotliwości awarii, a w związku z tym zmniejszenie opóźnień pociągów.

Tabela 2. Potencjalne korzyści zastosowania modułów baterii akumulatorów w połączeniu z zarządzaniem zasobami energetycznymi przy wykorzystaniu systemu GPS

Aspekt	Potencjalne Korzyści
Wykorzystanie potencjału wynikającego z rekuperacji – bliskie 100%	- zmniejszenie całkowitego poboru energii elektrycznej o 20-40%; - zmniejszenie emisji CO₂ do atmosfery o 20-40% - zmniejszenie strat energii elektrycznej w sieci trakcyjnej
Zmniejszenie wartości szczytowych poborów mocy	- zmniejszenie zużycia kluczowych elementów systemu zasilania trakcji kolejowej; - zwiększenie elastyczności systemu na dodatkowe obciążenia: możliwość zwiększenia ilości pociągów na godzinę lub wydłużania składów; - na odcinkach elektryfikowanych – instalacja urządzeń o mniejszych mocach znamionowych i obniżonych wymogach przeciążeniowych – mniejsze koszty budowy elektrycznej trakcji kolejowej; - znaczne zmniejszenie obciążeń sieci transmisyjnych i dystrybucyjnych zasilających kolej
Możliwość jazdy bez zasilania z sieci trakcyjnej	- możliwość jazdy taborów elektrycznych na odcinkach niezelektryfikowanych – ograniczenie emisji szkodliwych spalin i wyeliminowanie konieczności elektryfikacji tych odcinków; - w przypadku awarii sieci trakcyjnej – utrzymanie pełnego i nieprzerwanego ruchu pociągów
Ograniczenie spadków i wahań napięć w sieci trakcyjnej	- wydłużenie żywotności elementów trakcji; - zmniejszenie opóźnień pociągów

Podsumowanie

Tabela 2 stanowi podsumowanie potencjalnych korzyści zastosowania modułów baterii akumulatorów w połączeniu z zarządzaniem zasobami energetycznymi w kolei przy wykorzystaniu systemu GPS.

Zastosowanie zasobników energii na pokładzie pociągu w połączeniu z systemem GPS stwarza nie tylko szansę pełnego i racjonalnego wykorzystania rekuperacji, ale otwiera możliwość zarządzania zasobami energetycznymi w kolei. Ta możliwość niesie ze sobą ogromny potencjał. Korzyści odczuli by wszyscy: właściciele i operatorzy trakcji kolejowej, sieci transmisyjnych i dystrybucyjnych, ale przede wszystkim pasażerowie i środowisko naturalne.

Autor: mgr. inż. Michał Taratajcio, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, E-mail: Michal.Taratajcio@zut.edu.pl.

LITERATURA

- [1] <http://www.carbon-calculator.org.uk> – kalkulator emisji dwutlenku węgla
- [2] TESS, "New Cross - Tess Data – 2010", Network Rail, Wielka Brytania
- [3] Rory Dickerson, "20150715 IPEMU ATOC – Independently Powered Electric Multiple Unit", presentation, Network Rail, UK, July 2015
- [4] A. Szelaąg, Z. Drajek, T. Maciolek, „Elektroenergetyka miejskiej trakcji elektrycznej”, Wyd. Spatium, Radom, 2017.
- [5] ITU (International Telecommunication Union) "Directives concerning the protection of the telecommunication lines against harmful effects of electric power and electrified railway lines", 1998 Edition
- [6] IET, "The 9th Institution of Engineering and Technology Professional Development Course on Electric Traction Systems", Manchester, UK, November 2006
- [7] J. Podoski, J. Kacprzak, J. Myslek, „Zasady trakcji elektrycznej”, W-wa 1980
- [8] L. Mierzejewski, A. Szelaąg, M. Gałuszewski, „System zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego, W-wa 1989
- [9] T. Ratniyomchai, S. Hillmansen, P. Tricoli, „Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways”, IET Electrical Systems in Transportation, Birmingham 2013
- [10] N. Shiraki, K. Tokito, R. Yokozutsumi, „Propulsion System for Catenary and Storage Battery Hybrid Electric Railcar Series EV-E301”, Tokyo, Japan, 2015
- [11] Toshiba, „TESS Presentation_2018_June_Rev0”, Japan, June 2018
- [12] <http://www.toshiba.co.jp/sis/railwaysystem/en/products/power/tess.htm>
- [13] <http://www.abb.pl>
- [14] Szelaąg A., Maciolek T.- A 3 kV DC electric traction system modernisation for increased speed and trains power demand-problems of analysis and synthesis. Przegląd Elektrotechniczny 3a/2013
- [15] Maciolek T., Drajek Z. - Zasobnik energii w tramwaju zmniejszający zużycie energii. TTS Technika Transportu Szynowego 11/2004
- [16] <http://www.pesa.pl>
- [17] <https://www.solarisbus.com>