

Natalia Karkosińska-Brzozowska, Michał Urbaniak

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

BARIERY STOSOWANIA TECHNOLOGII ODZYSKU ENERGII W TRANSPORCIE SZYNOWYM

Rękopis dostarczono, październik 2016

Streszczenie: Na wstępie artykułu został przedstawiony przegląd istniejących technologii odzysku energii w procesie hamowania oraz możliwości jej wykorzystania. Omówiono możliwości akumulowania rekuperowanej energii w zasobnikach stacjonarnych oraz tych zainstalowanych w pojazdach, możliwość przesyłu energii do krajowej sieci energetycznej jak również jej bezpośredniego wykorzystania przez inne pojazdy znajdujące się na sieci. W części zasadniczej opracowania przeanalizowano czynniki ograniczające stosowanie poszczególnych rozwiązań. Wyszczególniono główne bariery utrudniające, bądź uniemożliwiające stosowanie opisanych technologii. W związku z istniejącymi problemami zaproponowano rozwiązania, które mogą przyczynić się zarówno do upowszechnienia stosowania odzysku energii w procesie hamowania, jak również do wzrostu efektywności wykorzystania tej technologii. Na zakończenie autorzy dokonali porównania zaprezentowanych technologii oraz proponowanych rozwiązań oraz wskazali ich zdaniem te najbardziej efektywne, zarówno pod względem technicznym jak i ekonomicznym.

Słowa kluczowe: transport szynowy, odzysk energii, pojazdy autonomiczne

1. WSTĘP

Na przestrzeni ostatnich lat bardzo duży nacisk kładziony jest zarówno na rozwój innowacyjnych technologii wytwarzania tzw. "zielonej energii" jak również ograniczanie energochłonności gospodarki, której jednym z głównych elementów jest transport (w tym transport szynowy). Świadczą o tym zarówno zapisy w polityce na szczeblu międzynarodowym dotyczące ograniczenia energochłonności transportu na terenie Unii Europejskiej [8], jak również prace badawcze poświęcone zagadnieniom usprawniania przewozów w celu pośredniej i bezpośredniej redukcji emisji gazów cieplarnianych (w tym CO₂) do atmosfery [2, 13, 15, 16].

Do technologii ograniczających energochłonność transportu szynowego mogących mieć wpływ na poprawę środowiska naturalnego niewątpliwie można zaliczyć technologię odzysku energii w procesie hamowania czyli rekuperację. Można ją realizować na wiele sposobów, a każdy z nich wiąże się z pewnymi ograniczeniami i barierami natury technicznej, organizacyjnej czy ekonomicznej.

2. TECHNIKI WYKORZYSTANIA ODZYSKANEJ ENERGII

W przypadku konwencjonalnych elektrycznych pojazdów trakcyjnych energia kinetyczna podczas hamowania jest bezpowrotnie wytracana w postaci energii cieplnej. W pojazdach wyposażonych w energoelektroniczne układy napędowe możliwe jest natomiast odzyskanie części energii pochodzącej z hamowania w postaci energii elektrycznej [17]. Jest to wynikiem wykorzystania odwrotnej pracy silnika trakcyjnego jako prądnicy. Energią odzyskaną w procesie hamowania rekuperacyjnego można zarządzać na różne sposoby. Są to między innymi [5, 10, 11, 12]:

- odzyskiwanie do globalnego systemu energetycznego kraju, co w przypadku polskiego systemu zasilania (3 kV DC w systemie kolejowym a AC systemie krajowym) wiąże się z koniecznością transformacji prądu z DC na AC,
- gromadzenie w zasobnikach energii umieszczonych w podstacjach trakcyjnych lub umieszczonych w/na pojazdach, a następnie wykorzystywanie zmagazynowanej energii elektrycznej zarówno na potrzeby trakcyjne jak i nie trakcyjne pojazdu czy podstacji,
- wykorzystanie możliwości magazynowania energii do wprowadzenia na trasach tzw. pojazdów autonomicznych,
- zastosowanie odzysku energii z hamowania w systemie transferu między pojazdami.

W dalszej części pracy autorzy niniejszej pracy postanowili się skupić na, ich zdaniem, najbardziej innowacyjnych technikach wykorzystania odzyskanej energii tj. pojazdach autonomicznych (z wykorzystaniem zasobników energii) oraz technologii odzysku energii w technologii pojazd – pojazd poprzez sieć trakcyjną.

2.1. POJAZDY AUTONOMICZNE

Prowadzenie pojazdów bez wykorzystania sieci trakcyjnej możliwe jest między innymi poprzez stosowanie w pojazdach zasobników energii takich jak superkondensatory, akumulatory elektrochemiczne oraz zasobniki kinetyczne. Rozróżnia się różne sposoby zasilania pojazdów w takich systemach. Może się to odbywać przy wykorzystaniu sieci trakcyjnej, ogniw paliwowych oraz poprzez bezstykowe zasilanie indukcyjne przez specjalne systemy w jezdni i w pojeździe. Możliwe jest punktowe ładowanie zasobników, które odbywa się w jezdni lub na przystankach pasażerskich przed odbyciem przejazdu autonomicznego. Stosowane są również systemy, które umożliwiają odcinkowe ładowanie zasobników. Odbywa się to na wybranych fragmentach trasy np. o dużym ujemnym pochyleniu podłużnym, gdzie istnieje konieczność zastosowania hamowania elektrycznego w celu utrzymania stałej prędkości. Daje to możliwość doładowania zasobników energią pochodzącą z rekuperacji. Dzięki znaczącemu postępowi technologicznemu w zakresie energoelektroniki i magazynowania energii zasobniki energii mogą być wykorzystane do zasilania pojazdów szynowych na odległości do 30 km. Umożliwia to eksploatację linii z odcinkami nieelektryfikowanymi, zwłaszcza tam, gdzie elektryfikacja jest szczególnie kosztowna np. w tunelach, na mostach i skrzyżowaniach. Dzięki zastosowaniu zasobników

energii możliwe jest odzyskiwanie energii z hamowania oraz jej gromadzenie w celu późniejszego wykorzystania przez pojazd np. na odcinku niezelektryfikowanym [28, 29].

Jazda autonomiczna najczęściej odbywa się na liniach zelektryfikowanych, gdzie występują krótkie odcinki niezelektryfikowane. Dzięki wyposażeniu pojazdu w zasobnik energii podczas jazdy pod siecią trakcyjną możliwe jest odzyskiwanie energii hamowania oraz doładowywanie zasobnika, a następnie jazda autonomiczna. Przykładem takiego rozwiązania w tramwajach jest pojazd Kawasaki "Swimo", który był testowany w Japonii od 2007 roku. Wyposażony był w baterie niklowo-metalowo-wodorkowe, a zasięg jazdy autonomicznej wynosił 10 km. Również w 2007 r. w Nicei został oddany do eksploatacji tramwaj Alstom Citadis, wyposażony w te same ogniwa co "Swimo", który będąc zasilanym z baterii pokonuje dwa odcinki o długości ok. 1 km. Kolejnym przykładem jest system firmy Skoda, który ma zastosowanie w tramwajach w tureckim mieście Konya od 2015 r. Nowoczesne tramwaje są wyposażone w baterie litowo-tytanowe i mogą przejechać do 8 km bez zasilania z trakcji [1, 28].

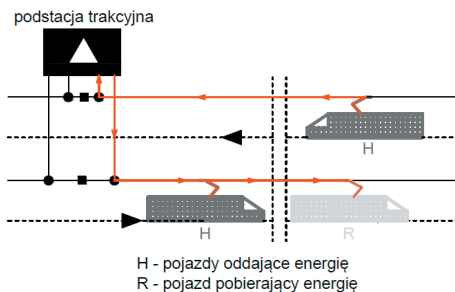
Stosowanie zasobników energii nie tylko do rekuperacji energii, ale też w celu jazdy autonomicznej rzadziej występuje w transporcie kolejowym. Pierwszym przykładem jest zasobnikowa jednostka trakcyjna, która rozpoczęła funkcjonowanie na regularnej linii w 2014 roku. Jest to linia Utsunomiya – Karasuyama w Japonii, której całkowita długość wynosi około 30 km, w tym 20,4 km odcinka niezelektryfikowanego. Elektryczny zespół trakcyjny serii EV-E301 wyposażony jest w baterie litowo-jonowe. Innym przykładem jest testowana zasobnikowa jednostka trakcyjna IPEMU (ang. Independently Powered Electric Multiple-Unit – autonomicznie napędzany elektryczny zespół trakcyjny). Czterowagonowy EZT typu Electrostar 379 został wyposażony w baterie fosforanowo-litowo-magnezowe. Testy odbywały się w Wielkiej Brytani w 2015 r. [4, 20].

Alternatywnym do trakcji napowietrznej sposobem ładowania zasobników jest zasilane indukcyjnie poprzez specjalne urządzenia umiejscowione pod powierzchnią jezdni lub nawierzchni kolejowej. Kiluminutowe ładowanie baterii litowo-jonowych możliwe jest, gdy odbiorcza cewka indukcyjna zamontowana w pojeździe, znajduje się nad urządzeniem w jezdni. Na tej zasadzie działa system Primove, który jest zastosowany w sieci tramwajowej Nanjing w Chinach od 2014 r., gdzie funkcjonują 2 linie o łącznej długości 17 km. Pojazdy FLEXITY 2 wyposażone są w 2 systemy baterii litowo-jonowych o pojemności 49 kWh każdy [9].

2.2. ODZYSK ENERGII W TECHNOLOGII POJAZD – POJAZD

Odzysk energii na drodze jej transferu w technologii pojazd – pojazd następuje dzięki wykorzystaniu odwrotnej pracy silnika jako prądnicy oraz jej przesłaniu poprzez sieć jezdnią do innego pojazdu (rys. 1). Uzyskanie takiej sytuacji jest związane w głównej mierze z synchronizacją czasów hamowania i rozruchu pojazdów, czyli cykli jazdy, w których pojazdy odpowiednio oddają lub pobierają energię elektryczną z sieci trakcyjnej. Oznacza to konieczność optymalizowania rozkładów jazdy lub stosowania adaptacyjnego sterowania ruchem pojazdów zależnego od sytuacji ruchowej na sieci. Zastosowanie tej technologii jest stosunkowo tanie, a zarazem może okazać się efektywne głównie na obszarach o

zwiększonej intensywności ruchu, lub na sieciach miejskiego transportu szynowego, gdzie prawdopodobieństwo i łatwość uzyskania wyżej opisanej sytuacji ruchowej są duże [12].



Rys. 1. Uproszczony schemat przepływu odzyskiwanej energii w systemie pojazd – pojazd
Źródło: opracowanie własne na podstawie [3]

Pomysł rekuperowania energii w technologii pojazd – pojazd był przedstawiany już przez wielu autorów. W [22] została przedstawiona metoda optymalizacji rozkładu jazdy oparta na algorytmach genetycznych, umożliwiającą wykorzystanie rezerw czasu przejazdu na takie prowadzenie ruchu pociągów, które umożliwi maksymalizację wykorzystania energii z hamowania rekuperacyjnego przez inne pojazdy. Proponowaną metodę zasymulowano dla przykładowego systemu metra i wykazano, że dzięki niej możliwe jest zaoszczędzenie energii trakcyjnej na poziomie 14%. Z kolei w pracy [25] autorzy zaproponowali nowy rozkład jazdy dla trzeciej linii metra w Madrycie udowadniając, że jego wprowadzenie umożliwi zaoszczędzenie 7% energii elektrycznej potrzebnej na cele trakcyjne. W rzeczywistości już po trzech dniach od wprowadzenia nowego rozkładu oszczędności sięgały 3%. Koncepcja odzysku energii w technologii pojazd – pojazd, została również przedstawiona w [24] oraz dla linii metra w Rennes [6], gdzie zdaniem autorów wprowadzenie jej umożliwiłoby oszczędności energii elektrycznej rzędu 12%.

3. BARIERY WYKORZYSTANIA TECHNOLOGII

3.1. TECHNICZNE

Wśród barier technicznych uniemożliwiających, bądź utrudniających wykorzystanie technologii przesyłu odzyskiwanej energii do sieci trakcyjnej należy wymienić budowę tejże sieci oraz podstawowy warunek na przepływ energii.

Mówiąc o aspekcie technicznym projektowania i budowy sieci jezdnych należy zwrócić uwagę na izolatory sekcyjne oraz przęsła izolowane. Znajdują się one najczęściej na odcinkach gdzie pociągi cyklicznie dokonują rozruchu (pobierają prąd z sieci) lub hamują (oddają prąd do sieci trakcyjnej). Odcinki te usytuowane są zwykle na obszarach punktów

ekspedycyjnych sieci kolejowej. Wynika to głównie ze Standardów Technicznych [27] zalecających odizolowanie sieci jezdnej torów głównych na szlaku od sieci należącej do stacji, tak aby w głowicy wjazdowej i wyjazdowej stacji było możliwe prowadzenie ruchu pociągów zgodnie z postawionymi wymaganiami technologicznymi posterunków ruchu. Powinno to ponadto zapewnić możliwość odłączenia napięcia na potrzeby naprawy lub konserwacji odcinka szlakowego lub stacyjnego przy zachowaniu pełnej zdolności ruchowej na obszarze. W przypadku gdy w sąsiednich sekcjach zasilania będzie panowało różne napięcie, pojazd przejeżdżający przez taki odcinek izolowany pobierając lub oddając energię do sieci może wytworzyć łuk elektryczny pomiędzy odbierakiem a przewodem jezdny. Taki proceder jest przyczyną szybszej degradacji zarówno sieci trakcyjnej jak i odbieraków prądu pojazdów trakcyjnych [35].

Warunek na przepływ energii (1) mówi o tym, że siła elektromotoryczna musi być większa od napięcia charakteryzującego w danym momencie sieć trakcyjną. Prąd rekuperacyjny popłynie jedynie w chwili gdy siła elektromotoryczna generowana przez prądnicę będzie wyższa niż napięcie w sieci [6].

$$E_s \geq U + I_s \cdot R_s \quad (1)$$

gdzie:

E_s – siła elektromotoryczna indukowana w silniku,

U – napięcie znamionowe sieci zasilającej,

I_s – prąd silnika,

R_s – rezystancja silnika.

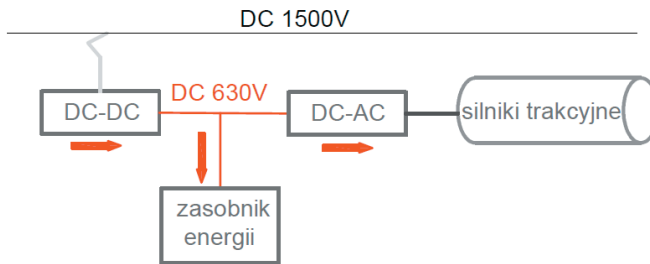
Możliwa jest zatem sytuacja, gdy napięcie w sieci będzie zbyt wysokie i powyższy warunek nie będzie spełniony. Ze względu na to konieczne jest współistnienie dwóch układów hamowania: odzyskowego i konwencjonalnego oporowego, który umożliwi wytracenie energii na opornikach w postaci ciepła.

Pewne ograniczenia techniczne wynikają również z samej specyfikacji stosowanych w pojazdach układów odzysku energii. Przykładowo Elektryczny Zespół Trakcyjny STADLER ED74 I Flirt ze względu na swoją charakterystykę ma możliwość przekazania całej energii pochodzącej z hamowania elektrodynamicznego z powrotem do sieci trakcyjnej tylko w przypadku gdy napięcie w sieci mieści się w przedziale od 2,7 kV do 3,6 kV. W chwili przekroczenia napięcia sieci 3,6 kV energia elektryczna przekazywana do sieci ulega redukcji, a jej nadmiar wytracany jest w postaci ciepła na rezystorach. Dla wartości napięcia wyższych niż 4,0 kV taktowanie prostowników silnika zostaje zablokowane, a powyżej 4,2 kV następuje automatyczne wyłączenie wyłącznika szybkiego [21].

Przy stosowaniu zasobników pojazdowych należy mieć na uwadze takie parametry jak możliwy zasięg maksymalny pojazdu oraz pojemność zasobników energii w stosunku do ich masy i objętości. W zależności od zastosowanego rodzaju zasobnika energii mogą występować różne bariery techniczne. Jedną z barier stosowania baterii elektrochemicznych jest ich mała gęstość mocy, przez co nie mogą być ładowane i rozładowywane dużymi prądami oraz w krótkim czasie. Natomiast superkondensatory cechuje duża gęstość mocy, ale mała wartość gęstości energii. W związku z czym coraz częściej stosuje się zasobniki hybrydowe składające się np. z baterii elektrochemicznych oraz superkondensatorów [11, 30, 33].

Na podstawie istniejących przykładów oraz wykonanych analiz stwierdza się, że przy zastosowaniu zasobników pojazdowych zwiększenie masy pojazdu może wynosić 4 tony przy zastosowaniu tylko baterii litowo – jonowych i długości odcinka autonomicznego ok. 30 km [31]. Studium zastosowania hybrydowego zasobnika pojazdowego wskazało na masę samego superkondensatora ok. 6 ton [19].

Pewnym utrudnieniem stosowania zasobników pojazdowych jest różne napięcie baterii oraz sieci trakcyjnej. W takich przypadkach, aby móc doładowywać zasobniki z trakcji elektrycznej, instaluje się przekształtniki DC-DC w pojeździe. Przykładowy schemat zasilania zasobników pokazano na rys. 2.



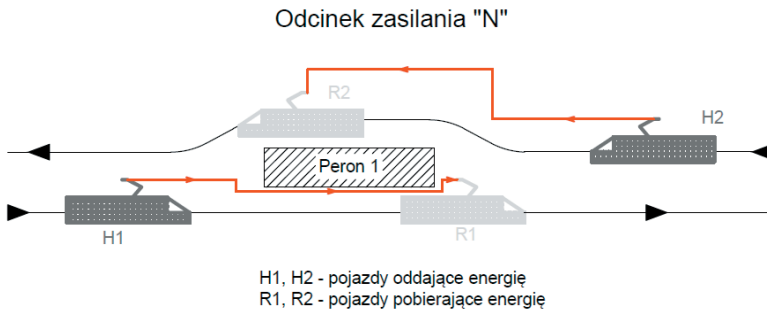
Rys. 2. Przykładowy schemat zasilania i ładowania zasobników w pojeździe
Zródło: opracowanie własne na podstawie [20]

Jednym z ważnych aspektów stosowania baterii elektrochemicznych jako zasobniki energii jest utrzymanie małych wahań temperatury, co wpływa na żywotność baterii. Odpowiednie monitorowanie i zarządzanie pracą zasobnika pozwala na zwiększenie efektywności oraz wydłużenie czasu jego eksploatacji [31].

3.2. ORGANIZACYJNE

Warunkiem umożliwiającym wykorzystanie technologii transferu energii między pojazdami jest istnienie takiej sytuacji ruchowej, w której [3, 24]:

- oba pojazdy, zarówno oddający energię do sieci (np. pojazd hamujący) jak i pobierający energię z sieci (np. pojazd ruszający), znajdują się na tym samym odcinku zasilania, najlepiej na obszarze gdzie występują częste cykle hamowania i rozruchu, np. w pobliżu posterunku ruchu (rys. 3), wówczas droga przepływu energii hamowania pojazd – sieć trakcyjna – pojazd jest optymalna z punktu widzenia strat przesyłu,
- pojazdy pobierające i oddające energię do sieci trakcyjnej znajdują się na sąsiednich odcinkach zasilania – ze względu na bardziej złożoną charakterystykę techniczną oraz straty przesyłu energii wariant ten został pominięty w dalszych rozważaniach dotyczących organizacji ruchu.



Rys. 3. Uproszczony schemat rekuperacji energii w systemie pojazd - pojazd w rejonie posterunku ruchu

Źródło: opracowanie własne

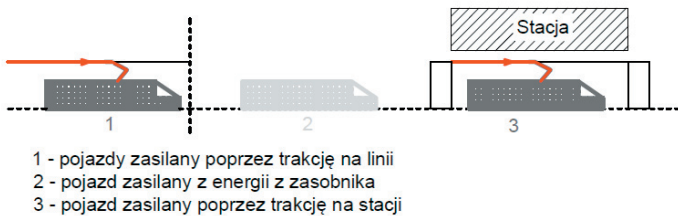
Aby zapewnić wyżej opisaną sytuację w procesie konstrukcji rozkładu jazdy powinno być zatem uwzględnione kryterium efektywności rekuperacji [14]. Nie może być to jednak kryterium nadrzędne, ponieważ uzyskanie idealnej sytuacji ruchowej dla efektywności odzysku energii wymaga znacznej ingerencji w czasach jazdy pociągów względem pierwotnego rozkładu jazdy. Zwykle ma to związek z wydłużeniem czasu przejazdu i pytaniem jakie opóźnienie przejazdu Δ jest w stanie zaakceptować podróżny na pewnym odcinku przejazdu S . Należy również pamiętać, że podczas reorganizacji rozkładu jazdy muszą zostać zachowane kryteria bezpieczeństwa przejazdu, które są określone między innymi poprzez zachowanie kryterium odstępu czasu i drogi, a także stacyjne oraz szlakowe odstępy czasu. Możliwości rekonstrukcji rozkładu jazdy są również ściśle związane ze zdolnością przepustową linii i stacji kolejowych [23]. Opisaną sytuację stosunkowo najprościej jest uzyskać na liniach metra gdzie rozkład jazdy jest zwykle cykliczny i symetryczny, a jego realizacja jest niezwykle dokładna.

Bariery organizacyjne stosowania zasobników pojazdów z założeniem odcinków jazdy autonomicznej również dotyczą rozkładu jazdy pociągów oraz organizacji sposobów i miejsc doładowywania. Dla każdego przypadku musi być zapewniony taki czas jazdy na odcinkach zasilanych np. z trakcji elektrycznej, aby pojazd mógł przejechać zadany odcinek będąc zasilany ze zgromadzonej wcześniej oraz odzyskanej energii. W zależności od charakteru linii i trasy możemy rozróżnić trzy ogólne przypadki systemu ładowania i jazdy:

- odcinek jazdy autonomicznej znajduje się na krańcu linii,
- doładowywanie zasobników odbywa się w stałych odstępach czasu,
- przed i po odcinkach jazdy autonomicznej linia jest zasilana z sieci jezdnej lub innego systemu zasilania.

W pierwszym przypadku (rys. 4) pociąg po przejechaniu odcinka zelektryfikowanego jest w stanie przejechać odcinek niezelektryfikowany. W celu doładowania zasobników energii, by była możliwa jazda powrotna, wymagany jest odpowiedni czas postoju na przystanku końcowym. Przykładem tego systemu jest linia Utsunomiya – Karasuyama w Japonii, gdzie pociąg po przejechaniu odcinka zelektryfikowanego (16 minut, 11,7 km) jest w stanie przejechać autonomicznie odcinek niezelektryfikowany (36 minut, 20,4 km). Na stacji końcowej zasobniki doładowywane są około 20 minut.

Zastosowanie systemu drugiego nie powoduje wydłużenia czasu postoju na przystankach, jeśli infrastruktura zasilająca na linii jest oddalona o podobne odległości lub jeśli znajduje się tylko na przystankach, które są zlokalizowane blisko siebie. System trzeci nie stanowi bariery organizacyjnej, jeśli długość odcinków zasilających jest na tyle długa, że doładowane zasobniki energii mogą zasilić pojazd na odcinku autonomicznym.



Rys. 4. Uproszczony schemat jazdy pociągu na linii częściowo niezelektryfikowanej

Źródło: opracowanie własne

3.3. EKONOMICZNE

W ruchu pociągów osobowych głównym ograniczeniem ekonomicznym stosowania technologii transferu odzyskiwanej energii między pojazdami nie jest koszt wprowadzenia tego rozwiązania, jak to ma miejsce w przypadku pozostałych technik wykorzystania odzyskiwanej energii, natomiast koszt potencjalnych strat czasu. W związku z koniecznością modyfikacji pierwotnego rozkładu jazdy dla celów maksymalizacji wykorzystania rekuperacji może nastąpić pewne przesunięcie czasowe kursujących pociągów. Prowadzi ono do opóźnień w stosunku do optymalnego w sensie minimalizacji czasu przejazdu rozkładu. Odrębne zagadnienie będzie stanowić opłacalność optymalizacji rozkładu jazdy w celu ograniczenia zużycia energii w ruchu towarowym.

Aby optymalizacja rozkładu jazdy w celu podniesienia efektywności odzysku energii, a co za tym idzie zmniejszenia kosztów była zasadna, dla pojedynczego pociągu musi zostać spełniona poniższa zależność:

$$C_{SE} > C_{LT} \quad (2)$$

gdzie:

C_{SE} - wartość zaoszczędzonej energii,

C_{LT} - wartość strat czasu.

Oszacowanie wartości zaoszczędzonej energii jest stosunkowo łatwe, ponieważ:

$$C_{SE} = E_S \times C_E \quad (3)$$

gdzie:

C_E - koszt 1 kWh energii,

E_S - wielkość zaoszczędzonej energii podana w kWh.

Przyjmując koszt 1 kWh energii trakcyjnej na poziomie 0,28144 PLN [26] otrzymamy:

$$C_{SE} = E_S \times 0,28144 \text{ [PLN]} \quad (4)$$

Dla obliczenia wartości brutto minuty opóźnienia pociągu pasażerskiego można natomiast zastosować metodę substytucji poprzez wyliczenie wartości utraconych zarobków przez pasażerów [32, 34]. Przyjmując średnie wynagrodzenie brutto w gospodarce narodowej Polski za 2015 rok na poziomie 3 900 PLN [7] oraz przeciętną liczbę godzin pracy w ciągu roku równą 2 016 (wyliczone w oparciu o Dz. U. z 2014 r. poz. 1502), można stwierdzić, że wartość straconej jednej minuty pracy (w_{LT}) dla statystycznego pracownika wyniesie:

$$w_{LT} = \frac{12 \times 3900}{2016 \times 60} \approx 0,39 \text{ [PLN/min]} \quad (5)$$

Zatem dla pociągu P_i , który będzie przewoził n pasażerów, cena jednej minuty opóźnienia (C_{LT}) wyniesie:

$$C_{LT} = c_k \times n \times w_{LT} = c_k \times n \times 0,39 \text{ [PLN/min]} \quad (6)$$

gdzie:

c_k - współczynnik stanowiący stosunek ceny biletu w klasie 2 pociągu wyższej kategorii do kategorii najniższej [34].

Uogólniając, w obszarze sieci kolejowej optymalizowanie rozkładu jazdy na potrzeby maksymalizacji zysków z odzysku energii ma ekonomiczne uzasadnienie tylko wtedy, gdy suma wartości zaoszczędzonej energii dla n pociągów będzie większa od wartości strat czasu dla tych pociągów:

$$\sum_{i=1}^n C_{SEi} > \sum_{i=1}^n C_{LTi} \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n (0,28144 \times E_{Si}) > \sum_{i=1}^n (0,39 \times c_{ki} \times n_i \times \Delta_i) \quad (8)$$

gdzie:

Δ_i - wartość opóźnienia podana w minutach,

n - liczba pociągów,

i - kolejny pociąg.

Zastosowanie zasobników energii niewątpliwie wymaga przeanalizowania opłacalności tego rozwiązania. Należy uwzględnić między innymi takie czynniki jak koszt zasobnika oraz zwiększenie zużycia energii przez pojazd ze względu na większą masę.

Dla przykładu analizy [19], w której zaproponowano wykorzystanie hybrydowego zasobnika energii można oszacować zmniejszenie zużycia energii rzędu ok. 4 kWh/km. Przy założeniu rocznego przebiegu pojazdu 150 tys. km daje to oszczędność ok. 600 MWh – 200 tys. zł. Koszt zasobowanego hybrydowego zasobnika to ok. 3 mln zł nie licząc kosztów obsługi. Przy tych założeniach zwrot nakładów mógłby nastąpić po 15 latach. Należy przy

tym uwzględnić żywotność zasobników, która wynosi 15 lat. Taka uproszczona analiza pokazuje, że dla danego przykładu należałoby rozważyć zmianę parametrów zasobnika.

4. PODSUMOWANIE

Wykazano, że istnieją różnorodne technologie odzysku energii w procesie hamowania oraz możliwości jej wykorzystania. Przedstawiono techniczne, organizacyjne i ekonomiczne bariery stosowania takich rozwiązań jak instalacja zasobników pojazdowych w celu rekuperacji energii i jazdy autonomicznej oraz technologia odzysku energii w technologii pojazd – pojazd poprzez sieć trakcyjną.

Zaproponowanymi rozwiązaniami, w celu możliwości odzysku energii w procesie hamowania w technologii pojazd – pojazd są spełnienie warunku na przepływ energii, występowanie odpowiedniej sytuacji ruchowej na sieci kolejowej oraz odpowiednie uwzględnianie w procesie konstrukcji rozkładu jazdy kryterium efektywności rekuperacji.

Rekuperacja energii z wykorzystaniem zasobników pojazdów i możliwością jazdy autonomicznej wymaga dostosowania rodzaju zasobnika do warunków linii, stosowania przekształtników DC-DC oraz urządzeń monitorujących i zarządzających pracą zasobnika. Jak również dostosowania rozkładu jazdy w zależności od systemu ładowania i jazdy pojazdów.

Jako warunek uwzględniający ograniczenia ekonomiczne przedstawiono zależność wskazującą na uzasadnienie optymalizacji rozkładu jazdy na potrzeby maksymalizacji zysków z odzysku energii. Przedstawiono również uproszczoną analizą, na przykładzie, której wskazano na czynniki istotne przy obliczeniu opłacalności magazynowania energii w zasobnikach.

Technologia odzysku energii hamowania w technologii pojazd – pojazd po spełnieniu odpowiednich warunków może być efektywna zarówno pod względem technicznym, jak i ekonomicznym. Wykorzystanie zmagazynowanej energii do wprowadzenia na niektórych odcinkach pojazdów autonomicznych ma uzasadnienie techniczne i organizacyjne. Efektywność ekonomiczna tego rozwiązania jest uzależniona od indywidualnego rozprzelenia charakteru linii i odcinków.

Bibliografia

1. Akiyama S.: The development of low floor battery-driven LRV "SWIMO". Kawasaki Heavy Industries, Ltd., Kobe, Japan 2008.
2. Ambroziak T., Jachimowski R., Pyza D., Szczepański E.: Analysis of the traffic stream distribution in terms of identification of areas with the highest exhaust pollution. Polish Academy of Sciences Archives of Transport 4/32, Warszawa 2014, s. 7-16.
3. Bartłomiejczyk M., Połom M.: Napięcie sieci trakcyjnej jako wyznacznik możliwości zwiększenia odzysku energii. Technika Transportu Szybnowego 4/2013, Łódź 2013, s. 42-46.
4. Batteries included: Prototype battery-powered train carries passengers for first time. Dostęp online 16.02.2016: <http://www.networkrailmediacentre.co.uk/news/>.

5. Batty P., Palacin R.: The Circumvention of Barriers to Urban Rail Energy Efficiency. *Urban Rail Transit 2/2015*, Springer Berlin Heidelberg 2015, s. 71-77.
6. Boizumeu J. R., Leguay P., Navarro E.: Braking energy recovery at the Rennes metro. *Workshop on Braking Energy Recovery Systems – Ticket to Kyoto, Bielefeld 2011*.
7. Dostęp on-line 15.02.2016: www.wynagrodzenia.pl/gus_roczne.php.
8. European Environment Agency: Adaptation of transport to climate change in Europe. EEA 8/2014, Luxembourg 2014.
9. First catenary-free trams with lightweight battery technology. Dostęp online 29.03.2016: <http://primove.bombardier.com/>.
10. González-Gil A., Palacin R., Batty P.: Optimal energy management of urban rail systems: Key performance indicators. *Energy Conversion and Management Vol. 90*, 2015, s. 282–291.
11. González-Gil A., Palacin R., Batty P.: Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy. *Energy Conversion and Management Vol. 75*, 2013, s. 374–388.
12. Gonzalez-Gil A., Palacin R., Powell J.P.: Energy-efficient urban rail systems: strategies for an optimal management of regenerative braking energy. *Transport Research Arena, Paris 2014*.
13. Jacyna M., Merksiz J.: Proecological approach to modelling traffic organization in national transport system. *Polish Academy of Sciences, Archives of Transport 2/30*, Warszawa 2014.
14. Jacyna M., Urbaniak M.: Wybrane zagadnienia wielokryterialnej optymalizacji ruchu kolejowego w aspekcie kosztów przewozu. *Materiały konferencyjne IV Międzynarodowej Konferencji Naukowej Najnowsze Technologie w Transporcie Szynowym, Józefów 2015*.
15. Jacyna M., Wasiak M., Lewczuk K., Kłodawski M.: Simulation model of transport system of Poland as a tool for developing sustainable transport. *Polish Academy of Sciences, Archives of Transport 3/31*, Warszawa 2014, s. 23-35.
16. Jacyna-Gołda I., Żak J., Gołębiowski P.: Models of traffic flow distribution for various scenarios of the development of proecological transport system. *Polish Academy of Sciences, Archives of Transport 4/32*, Warszawa 2014, s. 17-28.
17. Juda Z.: Zastosowanie superkondensatorów w układzie odzysku energii pojazdu z napędem elektrycznym. *Czasopismo Techniczne z. 6-M/2008*.
18. Kacprzak J., Mysłek J., Podoski J.: *Zasady trakcji elektrycznej*. WKiŁ, Warszawa 1980.
19. Karkosińska-Brzozowska N., Karwowski K.: Elektryczne autonomiczne jednostki trakcyjne na linii Pomorskiej Kolei Metropolitalnej? *Technika Transportu Szynowego 12/2015*.
20. Kono Y., Shiraki N.: Catenary and Storage Battery Hybrid System for Electric Railcar Series EV-E301. *The 2014 International Power Electronics Conference*.
21. Marciniak J.: Współczesne elektryczne zespoły trakcyjne ED74 I Flirt. *Logistyka-Nauka 6/2011*, Poznań 2011, s. 2447-2459.
22. Nasri A., Fekri Moghadam M., Mokhtari H.: Timetable optimization for maximum usage of regenerative energy of braking in electrical railway systems. *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion – SPEEDAM, Pisa 2010*.
23. Nowosielski L.: *Organizacja przewozów kolejowych*. KOW, Warszawa 1999.
24. Pazdro P.: Koncepcja ruchowej optymalizacji efektywności hamowania odzyskowego. *Technika Transportu Szynowego 1-2/2003*, Łódź 2003, s. 62-64.
25. Pena-Alearaz M., Fernandez A., Cucala A. P., Ramos A., Pecharroman R.R.: Optimal underground timetable design based on power flow for maximizing the use of regenerative-braking energy. *Journal of Rail and Rapid Transit 226/2011*, s. 397-408.
26. PKP Energetyka S.A.: Taryfa dla energii elektrycznej 2015. Dostęp on-line 15.02.2016: www.pkpenergetyka.pl/Energia-dla-kolei/Sprzedaz-energii-trakcyjnej/Taryfa-TRAKCYJNA-Bt21.
27. PKP PLK S.A., CNTK: Standardy techniczne: Szczegółowe warunki techniczne dla modernizacji lub budowy linii kolejowych do prędkości $V_{max} \leq 200$ km/h (dla taboru konwencjonalnego) / 250 km/h (dla

- taboru z wychylnym pudłem) TOM IV. Dostęp on-line 16.02.2016: www.plk-sa.pl/dla-klientow-i-kontrahtentow/akty-prawne-i-przepisy/standardy-techniczne.
28. Pyrgidis C. N.: *Railway Transportation Systems: Design, Construction and Operation*. Boca Raton, CRC Press 2016.
 29. Swanson J.: *Light rail systems without wires?*, 2003 IEE/ASME Joint Rail Conference, Chicago.
 30. Szelaąg A.: *Efektywność hamowania odzyskowego w zelektryfikowanym transporcie szynowym. Pojazdy Szynowe* 4/2009.
 31. Taguchi Y., Terada Y. A., Miki M., Hatakeda K., Kimura T.: *Evaluation of a Thermal Network Model for the Traction Battery of the Battery-Powered EMU*. Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2015 IEEE, s. 1-6.
 32. Tarski I.: *Czynnik czasu w procesie transportowym*. WKiŁ, Warszawa 1976.
 33. Wiczorek M., Lewandowski M.: *Badanie zasobnika hybrydowego w dynamicznych stanach obciążenia*. *Logistyka* 3/2015.
 34. Wolfenburg A.: *Optymalne kierowanie ruchem pociągów w obszarze sieci kolejowej*. Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej, Gorzów Wielkopolski 2011, s. 65-69.
 35. Zagazon P.: *SKM Warszawa - doświadczenia z pomiarem energii trakcyjnej oraz perspektywa wdrożenia rekuperacji energii hamowania*. *Transport i Komunikacja* 3/2009, Warszawa 2009.

OBSTACLES FOR THE USE OF ENERGY RECUPERATION TECHNOLOGY IN RAILWAYS

Summary: At the beginning of the article an overview of existing technologies for energy recovery from braking and the possibility of its use was presented. The possibility of storing energy in stationary and on-board storage devices and the possibility of power transmission to the national electricity grid as well as its direct use by other trains located on the network was discussed. The main part contains the analysis of the boundaries for implementation of particular solutions. The main obstructing or preclusive obstacles for using described technologies were listed. Due to existing problems the paper proposes the solutions that might both contribute to the promotion of the use of recuperation energy as well as increase efficiency in the use of this technology. In conclusion the authors compared the presented technologies and solutions proposed and selected in their opinion the most effective ones, both technically and economically.

Keywords: railway transport, energy recovery, autonomous vehicles